COSMOLOGÍA
La inflación cósmica a debate

AGRICULTURA
Plagas que sobrevuelan largas distancias

MEDICINA
Matemáticas para tratar el cáncer



Abril 2017 InvestigacionyCiencia.es

ADAPTADOS AL EJERCICIO

La singular evolución de nuestro metabolismo energético

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
ADAPTADOS AL EJERCICIO | LA INFLACIÓN CÓSMICA A DEBATE | ONCOLOGÍA MATEMÁTICA
N.º 487
ABRIL 2017



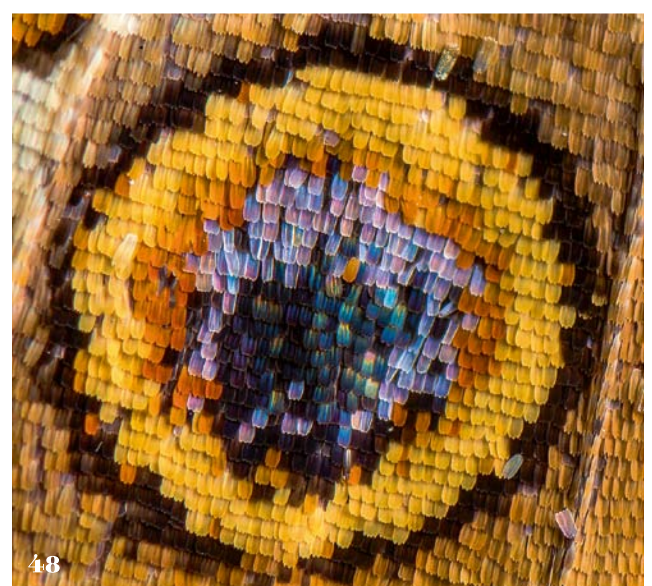

6,90 EUROS



RICHARD BARNES

ARTÍCULOS


4


48

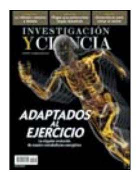

90

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Damos por sentado que las personas físicamente activas queman más calorías que las sedentarias. Pero los estudios demuestran que el gasto energético diario es, en gran medida, el mismo sea cual sea el nivel de actividad. Los resultados plantean preguntas intrigantes sobre la evolución de nuestra especie y el modo en que adquirimos nuestro singular metabolismo energético. Ilustración de Bryan Christie.



redaccion@investigacionyciencia.es



Septiembre, octubre y noviembre 2016

MISIÓN A UN ASTEROIDE

En «Siete años de misión para reunir 60 gramos de asteroide» [Investigación y Ciencia, septiembre de 2016], Dante S. Lauretta afirma que las regiones más seguras para la visita de la nave de la NASA *OSIRIS-REx* al asteroide Bennu «estarán probablemente cerca del ecuador, donde a la nave le resultará más fácil ajustarse a la velocidad de giro del asteroide para poder tocar la superficie».

Cabría pensar que las zonas más aptas para aterrizar o sobrevolar se encontrarían sobre los polos, especialmente si la velocidad de rotación del asteroide es elevada.

Steve Murphy
Cody, Wyoming

Responde Lauretta: *Para que una nave pueda hacer contacto de manera segura con la superficie de un asteroide en rotación, su velocidad debe igualar a la velocidad transversal de la superficie, la cual es máxima en el ecuador del objeto y nula en los polos. Es cierto que eso invita a pensar que lo más sencillo para* OSIRIS-REx *sería descender sobre un polo. Sin embargo, son varias las razones que hacen que no ocurra así.*

En primer lugar, en los polos no se cumplen las condiciones de iluminación necesarias para la maniobra de «toque y despegue». La zona en cuestión debe tener un ángulo de fase solar de 85 grados. No obstante, el polo de Bennu se encuentra prácticamente alineado con el plano de la eclíptica, por lo que dicho requisito resulta imposible de cumplir.

Otra restricción proviene del hecho de que la nave partirá para la maniobra de toque y despegue desde una órbita situada en el plano del terminador. Como consecuencia, tanto la exigencia de que la trayectoria de transferencia para el toque y despegue dure cuatro horas como el requisito de que el inicio del descenso tenga lugar cerca del periápside serían mucho más difíciles de satisfacer en las regiones polares.

A la hora de cumplir con las condiciones de velocidad de contacto requeridas por la maniobra de toque y despegue, algunos sitios exhiben mayores dificultades que otros. Con todo, las variaciones en la topografía de los alrededores y en el terreno que la nave sobrevolará al aproximarse ejercerán los mayores efectos en el desempeño de la maniobra.

SUPERVACÍOS CÓSMICOS

En «El lugar más vacío del universo» [Investigación y Ciencia, octubre de 2016], István Szapudi explica que, como consecuencia de la expansión acelerada del universo, los fotones experimentan una pérdida neta de energía al atravesar un «supervacío», una vasta extensión de espacio relativamente desprovista de materia y galaxias. Si este fenómeno no viola la conservación de la energía, ¿a dónde va a parar la energía de esos fotones?

Thomas Luckett
Portland, Oregón

Al principio del artículo, Szapudi afirma que, para observar el fondo cósmico de microondas, basta con sintonizar un televisor antiguo entre dos canales. Sin embargo, a menos que el detector de señal del aparato se haya enfriado hasta temperaturas criogénicas, el ruido térmico del detector sobrepasará con creces la señal debida al fondo de microondas, por lo que esta resultará imposible de observar.

John J. Carroll
Indianápolis, Indiana

Responde Szapudi: *Con respecto a la primera pregunta, el fotón no constituye un sistema aislado, sino uno que interacciona con el universo en expansión: es dicho universo en expansión el que absorbe la energía del fotón. Esa es la razón por la que, al salir, la partícula no puede recuperar por completo toda la energía que tenía antes de comenzar a cruzar el potencial cambiante del supervacío.*

En cuanto a la segunda pregunta, se ha estimado que en torno al uno por ciento de la «nieve» que puede verse en un televisor antiguo sin sintonizar es debida a la radiación del fondo cósmico. Se trata de una relación entre señal y ruido pequeña pero que no puede despreciarse, por lo que no supone ninguna exageración hablar de «observación».

ANTROPOCENO

En «Una historia estratificada» [Investigación y Ciencia, noviembre de 2016], Jan Zalasiewicz argumenta que el efecto del ser humano sobre el planeta justifica la definición de una nueva época geológica, el Antropoceno.

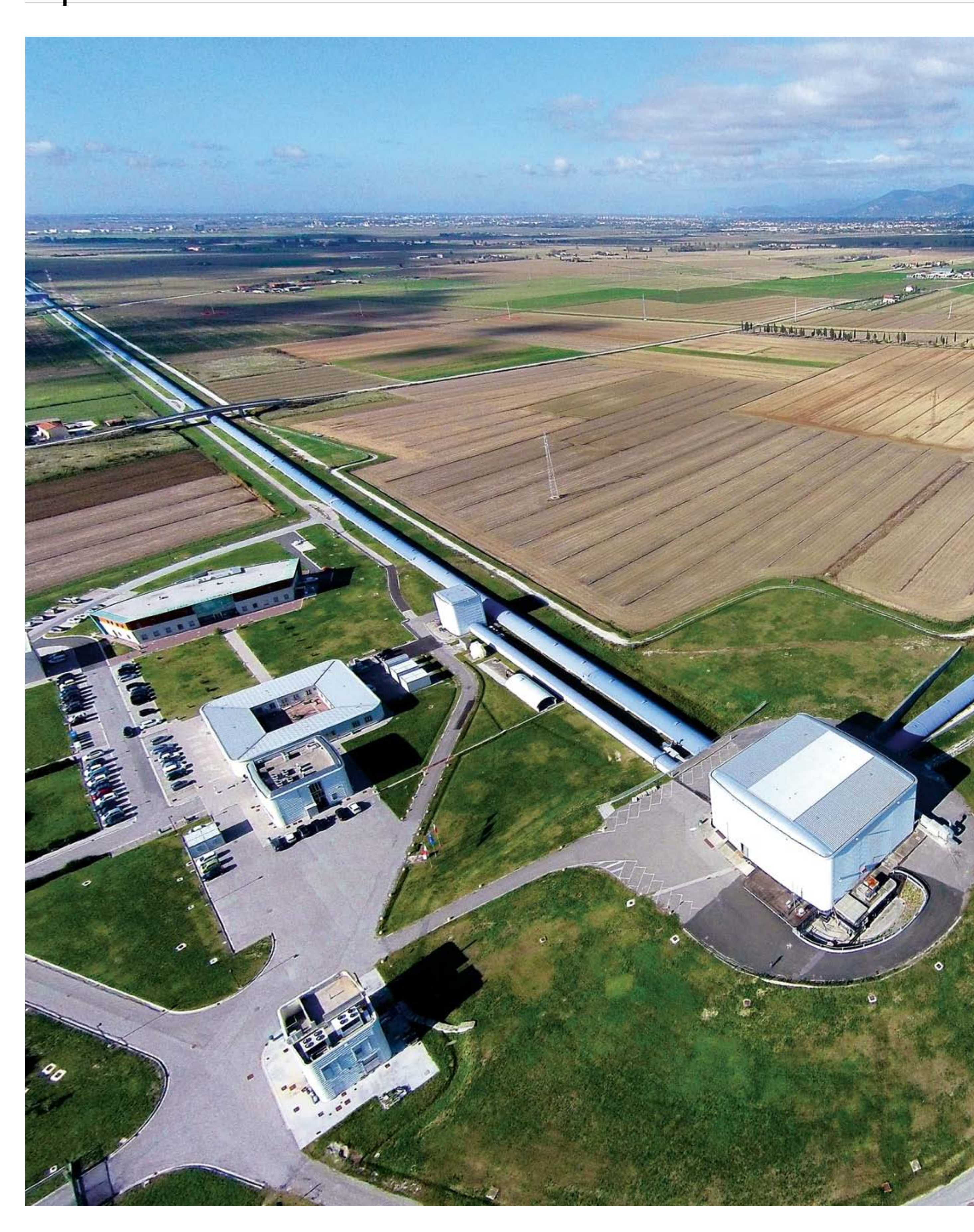
Si los humanos habitásemos el planeta durante varios millones de años, el término *Antropoceno* estaría en buena parte justificado. Sin embargo, existe la posibilidad de que acabemos exterminándonos a nosotros mismos en un corto período de tiempo. En tal caso, el impacto de la humanidad se asemejaría más bien al del asteroide que acabó con los dinosaurios: un abrir y cerrar de ojos en la escala geológica, breve y terrible. Más tarde, serían otras especies las que habrían de encargarse de ponerle nombre.

Soeren Hansen
Kongens Lyngby, Dinamarca

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.





CORTESÍA DE LA COLABORACIÓN VIRGO

EL DETECTOR de ondas gravitacionales Virgo, cercano a Pisa, tiene previsto entrar en funcionamiento dentro de poco. Sus observaciones se sumarán a las del experimento LIGO, en EE.UU., lo que posibilitará estudiar mejor las fuentes de ondas gravitacionales.

ASTROFÍSICA

Un nuevo detector de ondas gravitacionales

El experimento Virgo, cerca de Pisa, se sumará dentro de poco al estadounidense LIGO. Sus observaciones ayudarán a localizar en el espacio el origen de las ondas detectadas

La primera observación directa de ondas gravitacionales tuvo lugar hace año y medio. Dos detectores de extrema sensibilidad, uno situado en el estado de Washington y otro en Luisiana, captaron las distorsiones del espaciotiempo producidas por la fusión de dos agujeros negros. El hito fue hecho público cinco meses más tarde por los responsables del experimento, el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO). El anuncio causó sensación en todo el mundo y se convirtió en una de las noticias científicas más importantes de todo 2016. Los físicos llevaban décadas intentando obtener alguna prueba directa de la existencia de ondas gravitacionales, uno de los fenómenos predichos por la teoría de la relatividad general de Einstein, formulada en 1915 [*véase* «La observación de ondas gravitacionales con LIGO», por Alicia Sintes y Borja Sorazu; Investigación y Ciencia, febrero de 2017].

Pese a lo impresionante de aquel logro, el descubrimiento dejó algunas cuestiones en el tintero. La principal de ellas: ¿dónde se encontraba la fuente de las ondas? Dentro de poco, los científicos dispondrán de un laboratorio más para abordar esta pregunta en sus futuras detecciones.



CADA UNO de los dos brazos perpendiculares de Virgo (*fotografía*) mide tres kilómetros de longitud.

Los expertos trabajan ahora para poner en marcha el experimento Virgo, un tercer detector de ondas gravitacionales situado cerca de la ciudad italiana de Pisa. Cuando LIGO detectó las dos señales observadas hasta la fecha (una en septiembre y otra en diciembre de 2015), Virgo se hallaba fuera de servicio debido a labores de mantenimiento. Pero una vez que estos tres gigantescos detectores se encuentren operando a la vez, la localización de las fuentes mejorará de manera considerable. Además, una rápida respuesta a un «acierto triple» (la detección casi simultánea de la misma señal en los tres instrumentos) permitirá a los telescopios terrestres apuntar a una zona del cielo triangulada y mucho mejor acotada. En principio, ello haría posible divisar las violentas colisiones causantes del fenómeno.

Tanto Virgo como los observatorios de LIGO constan de dos brazos kilométricos dispuestos en forma de L. A su paso por la Tierra, una onda gravitacional modifica la longitud relativa de los brazos, lo cual es registrado por los detectores. La sensibilidad de los instrumentos es extrema: los cambios de longitud causados por el paso de una onda gravitacional son menores que el diámetro de un protón. En parte por esa razón, un solo instrumento no basta para descartar por completo que una señal se deba a vibraciones de origen terrestre. Cada detector vigila una gran porción de cielo: su campo de visión cubre alrededor del 40 por ciento de la esfera celeste, más o menos el equivalente a lo que veríamos desde un desierto al girar en redondo sobre nosotros mismos. Intente localizar una estrella concreta en todo ese espacio.

Emplear instrumentos gemelos resulta esencial por otra razón. Las ondas gravitacionales viajan a la velocidad de la luz, de modo que las detecciones en uno y otro observatorio suelen tener lugar con milisegundos de diferencia (un tiempo similar al que tardaría la luz en recorrer la distancia que los separa). Ese retraso permite calcular la dirección del impacto y acotar su origen en una zona algo menor. En el caso de las observaciones de 2015, el margen se redujo a un 2 por ciento del cielo. Con todo, sigue tratándose de una zona inmensa para localizar una fuente con precisión.

Es ahí donde entra Virgo. Antes de su puesta a punto, carecía de la sensibilidad requerida para detectar las ondas gravitacionales de mayor energía. Ahora se han incorporado nuevos espejos, bombas de vacío y láseres (los cuales se usan para medir las variaciones de longitud en los brazos del instrumento). También se ha mejorado la electrónica y se están haciendo los ajustes necesarios para eliminar las vibraciones locales. Los expertos trabajan contra reloj para que el experimento comience a funcionar este año antes de que LIGO deje de tomar datos para ser sometido a nuevas mejoras técnicas.

Cabe imaginar la observación de los estadios posteriores a una explosión de supernova o la radiación de alta energía generada por la fusión de dos agujeros negros

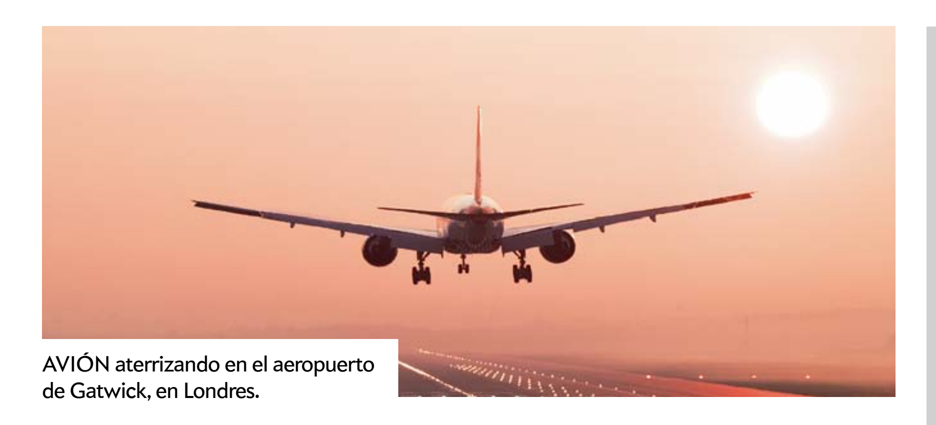
Cuando Virgo Avanzado comience a funcionar, la localización de las fuentes de ondas gravitacionales mejorará en un factor de cinco, explica Fulvio Ricci, portavoz de Virgo y físico de la Universidad La Sapienza, en Roma. Edo Berger, astrofísico de Harvard que estudiará con telescopios tradicionales los eventos que detecten LIGO y Virgo, matiza el avance: «Añadir un tercer detector mejorará considerablemente la determinación de las posiciones. Reducirá el problema [de la localización de las fuentes] de algo horrible a solo malísimo».

Con todo, resulta imposible negar las oportunidades astrofísicas que se vislumbran. Las colisiones de agujeros negros no constituyen los únicos sucesos capaces de distorsionar el espaciotiempo. Y algunos de esos otros fenómenos emitirán todo tipo de radiación electromagnética que podrá ser detectada por distintos telescopios. Por ejemplo, cabe imaginar la observación de los estadios posteriores a una explosión de supernova, la radiación de alta energía generada por la fusión de dos agujeros negros, la emisión en el visible de una colisión entre dos estrellas de neutrones, o la de uno de estos objetos atrapado por las fauces gravitatorias de un agujero negro. Los detectores de ondas gravitacionales aún no han captado las ondas producidas por esta clase de sucesos. Pero, cuando lo hagan, Berger y otros astrofísicos estarán preparados para apuntar con sus telescopios a un área delimitada por tres detectores en lugar de dos. Una localización espacial más ajustada permitiría que los telescopios de menor tamaño también se sumasen a las observaciones.

El plan actual contempla que los tres telescopios funcionen juntos durante al menos un mes. Esa ventana de tiempo proporcionaría una buena oportunidad para detectar al menos una fusión de agujeros negros, si no otros sucesos menos probables. B. S. Sathyaprakash, miembro de LIGO y físico de la Universidad de Pensilvania, opina que la colaboración bien podría animar a los responsables de ambos experimentos a extender sus tiempos de observación: «Los planes podrían cambiar si la gente se emociona», concluye el investigador.

—Katherine Wright

CLAUDIO GIOVANNINI, GETTY IMAGES



AVIÓN aterrizando en el aeropuerto de Gatwick, en Londres.

AERONÁUTICA

La NASA lucha contra los retrasos aéreos

Gracias a un nuevo sistema de control del tráfico aéreo, los pasajeros podrán pasar menos tiempo volando en un cielo abarrotado

A principios de 2017, dos grandes aviones de pasajeros y un reactor privado aterrizaron uno tras otro sin recibir la ayuda constante de un controlador aéreo. En su lugar, se sirvieron de una técnica de la NASA que permite a los aviones «hablar» automáticamente entre sí y con las torres de control. Si estos ensayos (acontecidos en un aeropuerto cercano a Seattle) resultan convincentes, la técnica podría llegar a la Administración Federal de Aviación de Estados Unidos. Y si todos los aviones adoptasen un día este sistema, un mayor número de ellos podría aterrizar en menos tiempo en unos aeropuertos cada vez más congestionados.

Hoy, cuando los aviones hacen cola para aterrizar, los pilotos se comunican constantemente con los controladores con el objetivo de que los aviones mantengan una distancia mínima de seguridad entre sí. El tiempo que se pierde con ese trasiego de información implica que los pilotos solo pueden ajustar la velocidad cuando oyen las comunicaciones de la torre de control. Esa espera hace necesario crear un «colchón» adicional de espacio por razones de seguridad, lo que limita el número de aviones que pueden aterrizar por unidad de tiempo.

El sistema de gestión de intervalos de vuelo (FIM) de la NASA acorta la charla: combina el posicionamiento de las aeronaves por medio de satélites con un sistema de órdenes asistido por ordenador, lo que permite rastrear la posición de los aviones y proporcionar a los pilotos información constante y actualizada sobre la velocidad a la que deben aterrizar. Eso elimina el colchón entre aviones y podría servir para ahorrar combustible, reducir las emisiones y aumentar el número de vuelos que llegan en hora. «Más aterrizajes por hora significa menos retrasos para los pasajeros», señala William Johnson, director de proyecto del Ensayo de Tecnología para la Gestión del Tráfico Aéreo-1 en el Centro de Investigaciones Langsley de la NASA. —*Jeremy Hsu*

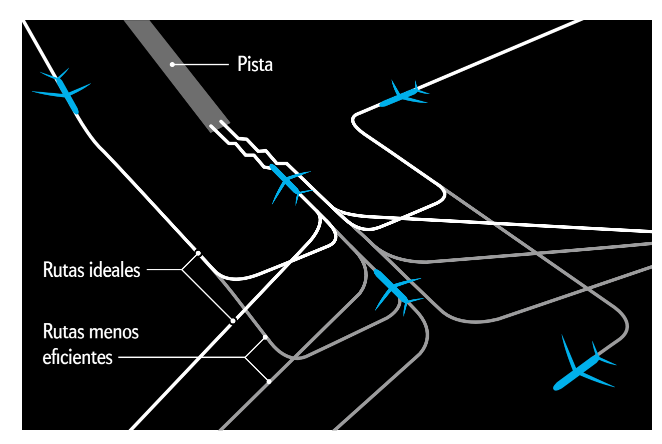
ASÍ FUNCIONA

1 Las señales de GPS determinan la posición de cada aeronave y su velocidad con respecto al suelo. El avión transmite esta información a los satélites y a las estaciones en tierra aproximadamente una vez por segundo.

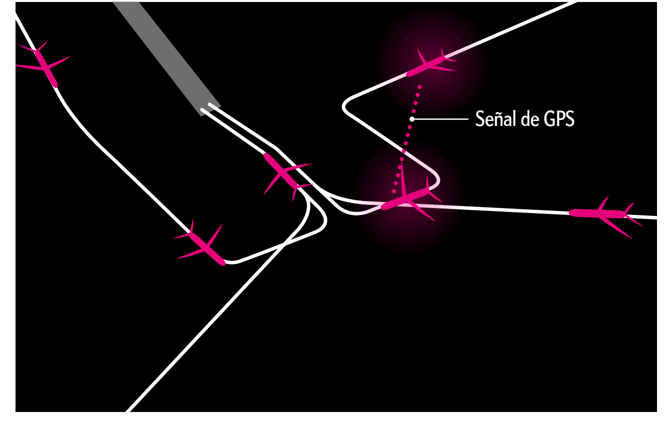
2 En tierra, un sistema informático emplea los datos de vuelo para calcular la separación ideal para cada avión de forma que se mantenga en descenso continuo y con bajo consumo de combustible. Los controladores de tráfico comunican por radio esa información a los pilotos.

3 Los pilotos introducen los datos de separación en el programa FIM de la NASA, instalado en el ordenador de la cabina de vuelo. El programa recibe también las actualizaciones de las velocidades de los aviones cercanos, derivadas de las señales de GPS.

4 El programa procesa toda esa información y calcula la velocidad adecuada para mantener una separación ideal entre los aviones sin poner en riesgo la seguridad. Esa velocidad se muestra a los pilotos y se actualiza sin cesar hasta que el tren de aterrizaje toca el suelo.



LOS CONTROLADORES AÉREOS asignan rutas ideales (*blanco*) a cada avión que llega. Cuantos más aviones se aproximan para aterrizar, menos eficientes son las rutas que reciben los pilotos (*gris*) con el objetivo de crear un espacio de seguridad entre los aviones. Una ruta más larga deja más tiempo para que los controladores puedan comunicar los ajustes de velocidad necesarios.



UNA NUEVA GENERACIÓN de sistemas de control permitirá que los aviones puedan seguir aterrizando a lo largo de las rutas más eficientes (*blanco*) incluso cuando haya mucho tráfico. La técnica FIM de la NASA ofrece a los pilotos órdenes constantes y automáticas sobre la velocidad, lo que evita el trasiego de comunicaciones y la consecuente necesidad de dejar un espacio de seguridad.

DEREK CROUCHER/GETTY IMAGES (*avión*); AMANDA MONTAÑEZ (*ilustración*).
FUENTE: DIVISIÓN DE SISTEMAS DE AVIACIÓN

GEOFÍSICA

Los reveladores sonidos de los tsunamis

Los terremotos que generan tsunamis producen unas ondas sonoras características que podrían ayudar a advertir con más tiempo a la población

Las boyas son el sistema de detección de tsunamis más al día. Los datos sísmicos permiten saber a los responsables que ha habido un terremoto submarino, pero la advertencia clave en caso de que el terremoto cree una serie de olas potencialmente devastadoras la darán unos sensores flotantes situados estratégicamente. Aun así, los avisos suelen emitirse solo unos minutos antes de que golpee el tsunami, si es que llega a haber tal aviso. Con la intención de que haya más tiempo para evacuar, algunos científicos han empezado a descifrar un nuevo aspecto de los sonidos que produce un terremoto submarino. Las ondas sonoras viajan a más de 1500 metros por segundo a través del agua, diez veces más deprisa que un tsunami.



LAS CONSECUENCIAS en Sumatra del tsunami del 26 de diciembre de 2004 en el océano Índico.

Usama Kadri, especialista en matemáticas aplicadas e ingeniero de la Universidad de Cardiff y del Instituto de Tecnología de Massachusetts, es uno de esos investigadores. Le interesan particularmente las «ondas de gravedad acústicas» emitidas por los terremotos que generan tsunamis. Esas ondas sonoras subacuáticas tienen unas frecuencias tan bajas que las fuerzas gravitatorias pueden alterar su longitud de onda y su velocidad bajo un cambio súbito de presión. En principio, gracias a las propiedades distintivas de esas ondas sonoras, se las podría reconocer dentro del ruido de fondo oceánico. «Sin la teoría de las ondas de gravedad acústicas puede predecirse un terremoto, pero no un tsunami», comenta Kadri.

Tal como describe en *Journal of Geophysical Research*, el experto ejecutó una simulación con los datos del tsunami que tuvo lugar en el océano Índico en diciembre de 2004 y se llevó cientos de miles de vidas. Las olas tardaron dos horas en llegar a Sri Lanka, por ejemplo, pero esta nación isleña no recibió ningún aviso de tsunami. Según los cálculos del estudio, si a mil kilómetros del epicentro del terremoto hubiese habido una estación detectora de ondas de gravedad acústica con hidrófonos se habría podido contar con un tiempo de aviso superior a los noventa minutos.

El trabajo de Kadri tiene importancia, pero todavía es solo teórico y contiene presuposiciones simplificadoras, apunta Ali Abdolali, investigador posdoctoral del Centro de Investigaciones Costeras Aplicadas de la Universidad de Delaware. Abdolali intenta descifrar también las ondas sonoras submarinas que emanan de los terremotos causantes de tsunamis. Se sabe desde hace más de sesenta años que los terremotos submarinos emiten sonidos específicos, pero la disponibilidad actual de hidrófonos sensibles y de computación más rápida ha encendido un renovado interés en este campo, explica Tiago Oliveira, miembro posdoctoral de la Institución Oceanográfica de Woods Hole que ha trabajado con Kadri. No obstante, este último advierte de que podrían pasar diez años o más hasta que los sistemas de aviso de tsunamis puedan basarse en el sonido.

—*Ryan F. Maldelbaum*

NEUROCIENCIA

¿Cuál de ellos es mamá?

Los anadones pierden la impronta cuando se manipula su visión

En verano de 2015, los zoólogos de la Universidad de Oxford Antone Martinho III y Alex Kacelnik iniciaron un bonito experimento con anadones y parches oculares. Querían averiguar si el modo en que los polluelos reconocen a sus madres depende del ojo con el que ven. ¿Por qué? Porque las aves carecen de una parte del cerebro humano que suponemos universal.

Entre el hemisferio derecho e izquierdo de nuestro cerebro se halla el cuerpo calloso, un grueso haz de fibras nerviosas que actúa como un circuito que posibilita la comunicación rápida entra ambos hemisferios y su coordinación como un todo coherente. Si bien los hemisferios no se hallan totalmente separados en las aves, estas no gozan de las ventajas que otorga ese canal nervioso. Esa peculiaridad de la neuroanatomía aviar propició un experimento natural. «Me hallaba en el parque de St. James de Londres, cuando vi algunos patitos en compañía de sus progenitores en el lago. Y se me ocurrió que podríamos estudiar la transferencia instantánea de información que tiene lugar a través de la impronta», relata Martinho.

Los investigadores taparon un ojo a 64 anadones recién nacidos y les mostraron un señuelo de pato adulto de color rojo o azul. El pato coloreado se convirtió en su «mamá» y los anadones comenzaron a seguirlo. Pero cuando a algunos de esos «tuertos» se les tapó el otro ojo no parecían reconocer a su «progenitor». Estos anadones mostraron la misma afinidad por el pato rojo que por el azul. Tuvieron que transcurrir tres horas antes de que comenzara a hacerse patente cierta preferencia. Por su parte, los anadones cuyos ojos se improntaron cada uno con un pato distinto no mostraron ninguna preferencia paterna cuando pudieron ver con ambos ojos a la vez. El estudio se ha publicado hace poco en *Animal Behaviour*.

Los resultados revelan la carencia fundamental de una comunicación rápida entre el lado derecho y el izquierdo del cerebro aviar y deja claro que la información recibida por cada ojo se transmite a un solo hemisferio. Podría parecer que no es una buena estrategia esa de registrar los recuerdos en lados distintos del cerebro, pero Giorgio Vallortigara, neurocientífico de la Universidad de Trento que es ajeno al estudio, opina que vivir sin cuerpo calloso podría tener una ventaja: cada hemisferio se especializaría en diferentes tipos de memoria.

Las aves suelen utilizar ambos ojos y eso permite que las dos mitades del cerebro trabajen en armonía. «Esto significa que llevan a cabo adaptaciones etológicas soberbias con el fin de integrar dos flujos discontinuos de información antes de tomar decisiones. Ser un ave parece muy distinto a lo que pensábamos», afirma Martinho.

—*Jason G. Goldman*

PATRICK M. BONAFEDE, GETTY IMAGES (*Sumatra*); DON FARRALL, GETTY IMAGES (*pato*)

CONSERVACIÓN

Una salvación para los líquenes

Ciertas especies raras amenazadas por el ascenso del mar podrían ser trasladadas a terrenos más altos

A consecuencia del cambio climático, el mar engullirá previsiblemente gran parte de los bosques palustres de Carolina del Norte y su biodiversidad. Pero varios moradores de la Reserva Natural Nacional del Río Alligator podrían conseguir un salvoconducto para huir justo a tiempo. Algunos de los líquenes que ornan la corteza de los árboles autóctonos podrían ser arrancados con esmero y trasladados a un nuevo hábitat en virtud de un plan que un equipo de liquenólogos está elaborando en estos momentos.

Y es que es mucho lo que hay en juego en torno a algunos de estos peculiares organismos. Casi todos los especímenes vivos del llamado liquen lunar de Dey (*Sticta deyana*) se concentran en unos kilómetros cuadrados de la reserva. A esa especie se le suman otras raras y endémicas, también en riesgo. El anegamiento por el agua salada acabará destruyendo los ecosistemas forestales de las zonas bajas, como los bosques palustres de la región del Río Alligator, por lo que su reubicación sería el único modo de salvar a la mayoría de los líquenes autóctonos. Sin ayuda, probablemente cerca de la mitad de la población liquénica de la región se perdería para siempre y el resto podría desaparecer en medio siglo, en el peor de los casos. Con el afán de evitar ese triste final, James Lendemer, conservador y liquenólogo del Jardín Botánico de Nueva York, está proyectando junto con otro colega un plan ambicioso para reubicar comunidades liquénicas enteras de la región, entre ellas la del liquen lunar de Dey.

Los líquenes son el resultado de la relación simbiótica entre un hongo, un alga y, en ocasiones, cianobacterias. Ofrecen cobijo a las arañas, los nematodos y las polillas, así como alimento a los topillos, el caribú (reno) y otros ungulados. Asimismo, contribuyen a regular el microclima y mantienen estable el nivel de humedad, pues absorben el agua procedente de la niebla, el rocío y la lluvia y la liberan después en el dosel del bosque.

De 2012 a 2016, Lendemer y Jessica Allen, investigadora del jardín botánico, han catalogado una rica biodiversidad liquénica desde el sur de Nueva Jersey hasta Carolina del Sur, que incluye el liquen lunar de Dey. El equipo ya ha trazado posibles migraciones asistidas de líquenes de la llanura litoral medio-atlántica de EE.UU. y ha ensayado las técnicas de trasplante con diversas especies de líquenes en los Apalaches meridionales, que han culminado con éxito. Allen extrae con cuidado los ejemplares con la ayuda de unas pinzas y, para trasladarlos, los deposita sobre superficies diversas, como tela de arpillera, gasa o malla de plástico. Ahora el equipo está estudiando el modo de trasplantar las comunidades liquénicas de los hábitats en peligro, entre ellas los bosques palustres de la llanura litoral medio-atlántica, hasta reservas cercanas u otras partes del área de distribución pretérita de la especie. El equipo ha detallado sus resultados en *Biological Conservation* el pasado mes de octubre.

No es la primera vez que los liquenólogos trasladan especímenes a otros lugares, pero el esfuerzo de reubicar comunidades enteras de estos organismos supone una nueva estrategia conservacionista, asegura Christopher Ellis, especialista en líquenes del Real Jardín Botánico de Edimburgo. Los líquenes se benefician conjuntamente de la contribución de cada individuo de su clase al establecimiento de las condiciones ideales, como un grado de humedad determinado. Por ello, si se pretende asegurar su supervivencia a largo plazo, es primordial el traslado de múltiples especies de cada comunidad. Los avances en los trasplantes conjuntos logrados en Norteamérica podrían inspirar intentos similares a lo largo del litoral escocés. En esa región, los especialistas en conservación podrían trasladar los líquenes costeros desde la orilla del mar hasta hábitats restaurados, apunta Ellis, como parte de una ambiciosa «retirada planificada» en respuesta al embate de las aguas en ascenso.



—*Roger Drouin*

JASON HOLLINGER *(liquen)*; PARQUE DE LAS CIENCIAS *(robot)*

AGENDA

CONFERENCIAS

4 de abril
En busca de nuestros orígenes cósmicos con los telescopios más avanzados del mundo en el Observatorio Europeo Austral
Tim de Zeeuw, Observatorio Europeo Austral
Fundación BBVA
Madrid
www.fbbva.es

5 de abril
Ciencia y cocina: 50 preguntas abiertas al público
Ferran Adrià
Claudi Mans, Universidad de Barcelona
CosmoCaixa
Barcelona
agenda.obrasocial.lacaixa.es

18 de abril
De Marie Curie a la igualdad: Las mujeres y las ciencias
María Jesús Santesmases, Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC)
Museo de la Romanización
Calahorra
www.ciudadciencia.es

EXPOSICIONES

Robots: Los humanos y las máquinas
Parque de las Ciencias
Granada
www.parqueciencias.com



OTROS

A partir del 6 de abril — Cine
Amateurs en el espacio
Max Kestner
Proyección en numerosas ciudades de toda España
www.eldocumentaldelmes.com

Hasta el 16 de abril — Concurso
Ciencia Clip
Concurso de vídeos de ciencia para estudiantes de secundaria
Cátedra de Cultura Científica de la Universidad del País Vasco
cienciaclip.naukas.com

EVOLUCIÓN

Nuevos datos sobre el origen de la célula eucariota

Un grupo de organismos procariotas recién descubierto revela pasos intermedios en la evolución de la célula nucleada

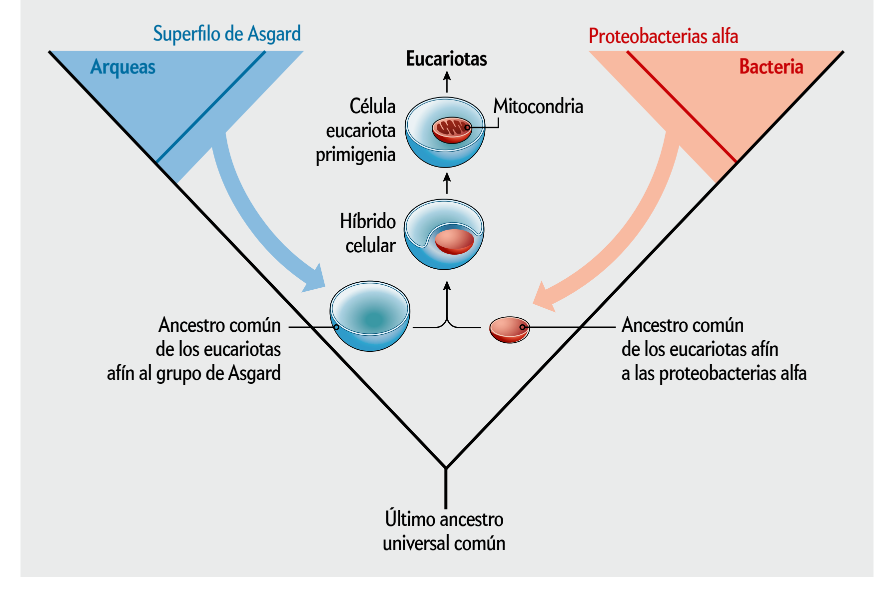
JAMES O. MCINERNEY Y MARY J. O'CONNELL

La célula eucariota alberga orgánulos membranosos, como el núcleo, y componentes celulares complejos, como los sistemas de transporte de moléculas a través del medio celular interno. Hace unos 1800 millones de años, este tipo de célula se gestó a partir de una antecesora desprovista de esos atributos: la célula procariota. Pese a lo anterior, el árbol genealógico de la célula dista de estar completo, sobre todo por las lagunas que separan los organismos procariotas de los eucariotas. Las pruebas reunidas en torno a la aparición de ciertos rasgos específicos de los eucariotas en el curso de la evolución son escasas. En un artículo publicado el pasado enero en la revista *Nature*, K. Zaremba-Niedzwiedzka, de la Universidad de Uppsala, y sus colaboradores han descubierto un superfilo lateral del árbol procariota, al que han denominado arqueas de Asgard, que acoge ciertos genes hasta ahora atribuidos exclusivamente a los eucariotas.

De acuerdo con su contenido génico y con aspectos de su fisiología celular, los procariotas se dividen en dos dominios: las bacterias y las arqueas. Ambas poseen un mismo antepasado denominado el último ancestro universal común. Se cree que los eucariotas descienden de un híbrido que se gestó cuando una arquea engulló sin digerir una bacteria afín a las modernas proteobacterias alfa. Se ha planteado que, dentro de esas células eucariotas primigenias, la proteobacteria internalizada evolucionó hasta acabar convirtiéndose en el tipo de orgánulo membranoso que suministra la energía a la célula: la mitocondria. Con todo, las primeras etapas de la evolución eucariota han permanecido en las tinieblas, pues son excepcionales las especies conocidas cuyo genoma puede aportar pistas sobre la transición de la célula procariota a la eucariota.

UN PASO INTERMEDIO EN LA EVOLUCIÓN CELULAR

El último ancestro universal común de las células evolucionó hasta engendrar los dominios de las arqueas y las bacterias, también llamadas procariotas. Las células eucariotas se habrían originado a partir la fusión de una arquea con una bacteria emparentada con las proteobacterias alfa actuales. Con todo, son muchos los aspectos de la evolución de la célula eucariota primigenia que restan por descubrir; por ejemplo, el modo en que surgieron los atributos propios de los eucariotas, como los orgánulos membranosos (entre ellos, las mitocondrias). El estudio reciente de las secuencias genómicas de microorganismos abisales ha revelado un superfilo de arqueas, bautizado como grupo de Asgard, que se situaría cerca del linaje de las células eucariotas. Los miembros de este superfilo contienen versiones de genes que hasta la fecha se consideraban exclusivas de los eucariotas.



La evolución, escrita en el ADN

Hasta la fecha, los ancestros que se consideraban más cercanos a las células eucariotas pertenecían al grupo de las arqueas de Loki; fueron descubiertas con la secuenciación del genoma de microorganismos hallados en sedimentos marinos. Las lokiarqueas poseen atributos que se suponían privativos de los eucariotas, como varios genes lejanamente emparentados con los implicados en el transporte proteico. Para entender la transición de la vida celular procariota a la eucariota se precisa una perspectiva más amplia de los genes arqueanos que dieron origen a las células eucariotas.

El ADN que codifica las secuencias del ARN ribosómico 16S se usa a menudo para determinar los lazos genéticos entre las especies (filogenia). Hace veinticinco años, el estudio de ese ADN obtenido de microorganismos marinos reveló la presencia de grupos de arqueas emparentados solo remotamente con las arqueas cultivadas en los laboratorios. De ese trabajo se dedujo que los procariotas cultivados eran apenas una pequeña parte de la diversidad procariota de la Tierra. Los resultados de Zaremba-Niedzwiedzka han confirmado también que quedan por descubrir grandes grupos del árbol de la vida.

Los autores obtuvieron muestras de sedimentos acuáticos procedentes de siete lugares del globo. Extrajeron fragmentos cortos de ADN que representaban la

mezcla de especies existentes en ellos y secuenciaron más de 644.000 millones de nucleótidos. Ensamblaron los fragmentos cortos de secuencias en pedazos más largos e identificaron aquellas que contenían como mínimo seis genes de un conglomerado génico de proteínas ribosómicas evolutivamente conservadas. Analizaron tales secuencias para conocer la relación taxonómica entre los genomas muestreados y determinaron las que más se asemejaban a las de las arqueas de Loki y de Thor (otro grupo vinculado con los eucariotas), previamente analizadas.

Los investigadores recurrieron a un método estadístico para clasificar las secuencias ribosómicas en función de las similitudes halladas en los patrones de los nucleótidos utilizados. Con dicho análisis, descubrieron un superfilo de arqueas que albergaba cuatro grandes linajes: las arqueas de Loki, de Thor, de Odín y de Heimdall. Fieles a la mitología escandinava, bautizaron el nuevo superfilo con el nombre de Asgard. Los lazos genealógicos exactos entre los grupos que conforman el superfilo son difíciles de deducir a causa de la incertidumbre estadística que envuelve los árboles filogenéticos trazados. Pero los análisis sustentan la existencia del superfilo como un todo.

Genes propios de eucariotas

De la posición que el grupo de Asgard ocupa en el árbol genealógico de la vida celular se deduce que sus miembros constituirían el linaje hermano de arqueas más cercano a los eucariotas. Ello apoya la idea que rechaza la hipótesis de los tres dominios, la cual plantea la génesis de los eucariotas como un suceso independiente de la diversificación de las bacterias y las arqueas. El trabajo de Zaremba-Niedzwiedzka se suma al cúmulo de pruebas que califica a los eucariotas como descendientes de un híbrido entre arqueas y bacterias.

En los grupos de arqueas de Asgard recién descubiertos, los autores han hallado varios genes similares a los eucariotas que intervienen en el transporte, la transmisión de señales y la degradación de las proteínas, y cuya presencia ya se había descrito en las lokiarqueas. También han revelado repertorios ampliados de tales genes. No hay duda de que los miembros de Asgard no son eucariotas. Así y todo, albergan ciertos tipos de genes que hasta ahora se atribuían en exclusiva a las primeras etapas de la evolución eucariota. La investigación lleva más atrás el origen de ciertos componentes de la maquinaria celular.

De particular interés en el grupo de Asgard resultan los genes vinculados con el citoesqueleto, el armazón de proteínas que otorga a la célula su forma y ayuda a organizar su estructura interna. La proteína tubulina forma filamentos que son primordiales para el citoesqueleto y la división de la célula eucariota. La presencia de tal molécula en las arqueas no es algo inédito. No obstante, Zaremba-Niedzwiedzka y sus colaboradores han descubierto que la secuencia de la tubulina de las arqueas de Odín se asemeja a la de los eucariotas. También han hallado secuencias que codifican otros componentes citoesqueléticos. Las secuencias descubiertas no constituyen el plano de un complejo citoesquelético eucariota completo, pero los autores indican que esas máquinas celulares, antes consideradas específicas de los eucariotas, podrían tener su origen en las arqueas.

Las secuencias de Asgard contienen también elementos de la maquinaria procesadora de ADN que se creían exclusivos de los eucariotas. Entre ellos figuran versiones de la subunidad ε de las enzimas ADN-polimerasas. En los eucariotas, esta subunidad contiene tres dominios. En el grupo de Asgard, en cambio, solo alberga dos y carece del dominio evolutivamente conservado, cuya función se desconoce.

Otro descubrimiento sorprendente fue el hallazgo en el superfilo de Asgard de versiones de genes que codifican proteínas reguladoras del tráfico de la membrana que son propias de los eucariotas. En las células nucleadas, tales proteínas intervienen en el trasiego de las proteínas por toda la célula desde el retículo endoplasmático y el complejo de Golgi. Pero el pequeño tamaño de las células procariotas induce a pensar que esos mecanismos de tráfico intracelular podrían no ser necesarios. Dada la ausencia de esos orgánulos en ellas, no está claro qué cometido desempeñarían tales genes en las arqueas. Por supuesto, la similitud de secuencias no garantiza una función conservada desde el punto de vista evolutivo. El ancestro celular común más reciente de Asgard y de las células eucariotas vivió hace 1800 millones de años, por lo que esos genes han podido evolucionar de forma independiente a lo largo de 3600 millones de años, lapso más que suficiente para propiciar la aparición de cuantiosas diferencias funcionales en las proteínas codificadas.

La distribución de los genes atribuida hasta ahora a los eucariotas resulta desigual en el superfilo de Asgard. Ningún grupo de arqueas parece poseer el juego completo. De ello se deduce que si bien los eucariotas necesitan normalmente todos esos genes, no sucede así entre los integrantes de Asgard. Que se sepa, hasta la fecha nadie ha podido observar a través del microscopio ninguno de los miembros de este superfilo, ni tampoco cultivarlos en el laboratorio. Muchos detalles esenciales de su ecología, evolución y biología celular aguardan, pues, a ser descritos. Sin duda, el estudio minucioso del superfilo arrojará luz sobre la génesis de la célula eucariota.

—James O. McInerney
División de evolución y ciencias genómicas
Facultad de ciencias biológicas y Centro Universitario de Ciencias de la Salud de Manchester
Universidad de Manchester

—Mary J. O'Connell
Grupo de biología evolutiva molecular y computacional
Facultad de ciencias biológicas
Universidad de Leeds

Artículo original publicado en *Nature* vol. 541, págs. 297-299, 2017. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2017

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

The hybrid nature of the Eukaryota and a consilient view of life on Earth. J. O. McInerney, M. J. O'Connell y D. Pisani en *Nature Reviews Microbiology*, vol. 12, págs. 449-455, 2014.

Complex archaea that bridge the gap between prokaryotes and eukaryotes. A. Spang et al. en *Nature*, vol. 521, págs. 173-179, 2015.

Asgard archaea illuminate the origin of eukaryotic cellular complexity. K. Zaremba-Niedzwiedzka et al. en *Nature*, vol. 541, págs. 353-358, 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de las células eucariotas. Christian de Duve en *IyC*, junio de 1996.

El origen de las células. Toni Gabaldón en *IyC*, noviembre de 2009.

ASTRONOMÍA

La misión Gaia y la historia de nuestra galaxia

La mayor cámara jamás enviada al espacio determinará con una precisión extraordinaria las posiciones, distancias, movimientos y propiedades de más de mil millones de estrellas de la Vía Láctea. ¿Por qué es tan importante este proyecto?

CARME JORDI Y EDUARD MASANA

El universo actual contiene grandes concentraciones de estrellas a las que llamamos galaxias. Estas nacieron a partir de pequeños agregados de estrellas y materia oscura creados en el universo temprano, los cuales fueron uniéndose entre sí a lo largo de la historia cósmica. Así pues, el pasado de nuestra galaxia ha quedado impreso en las propiedades y los movimientos de sus estrellas. Si estudiamos con detalle un gran número de ellas, podremos entender mucho mejor la Vía Láctea en todos sus aspectos.

A tal fin, la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó en 2013 la misión Gaia, cuyos primeros resultados se dieron a conocer hace unos meses. El objetivo de este ambicioso proyecto consiste en confeccionar un mapa preciso de más de mil millones de estrellas en 6 dimensiones: 3 para situar cada objeto en el espacio y otras 3 para describir su movimiento en cada dirección. Para hacernos una idea de lo que esto supone, cabe recordar que, hasta ahora, solo se conocían las posiciones precisas de unas 120.000 estrellas. Las distancias que las separan de la Tierra fueron medidas con gran precisión entre 1989 y 1993 por la misión Hipparcos, también de la ESA.

Las estrellas más débiles que Gaia puede detectar son un millón de veces más tenues que las más débiles que podemos apreciar a simple vista. Pero el número de estrellas no constituye el aspecto más relevante de Gaia: su ventaja principal radica en la precisión con la que es capaz de determinar la posición y el movimiento de los astros.

Para calcular la distancia a la que se halla cada estrella, Gaia mide el ángulo de paralaje; es decir, el pequeño desplazamiento que experimenta la posición aparente de un astro como consecuencia del movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Tales desplazamientos son minúsculos debido a la enorme distancia a la que se encuentran las estrellas, por lo que resultan inapreciables para la mayoría de los instrumentos. Pero no así para Gaia: su diseño le permite medir ángulos tan diminutos como el que subtenderían los ojos de un astronauta en la Luna visto desde la Tierra. Esa resolución angular aplicada a tantas estrellas es lo que convierte a Gaia en una misión única.



CARTÓGRAFO GALÁCTICO: La misión Gaia, de la Agencia Espacial Europea, cartografiará con una precisión sin precedentes las estrellas de la Vía Láctea para desenterrar su historia. Esta recreación artística muestra el aspecto del satélite en órbita. La pantalla circular, de unos 10 metros de diámetro, protege al instrumento de la luz solar. Sus dos telescopios se encuentran en el módulo central, de unos 3 metros de alto.

ESA/ATG MEDIALAB *(nave)*; OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL (ESO)/S. BRUNIER *(fondo)*

Setenta millones de astros al día

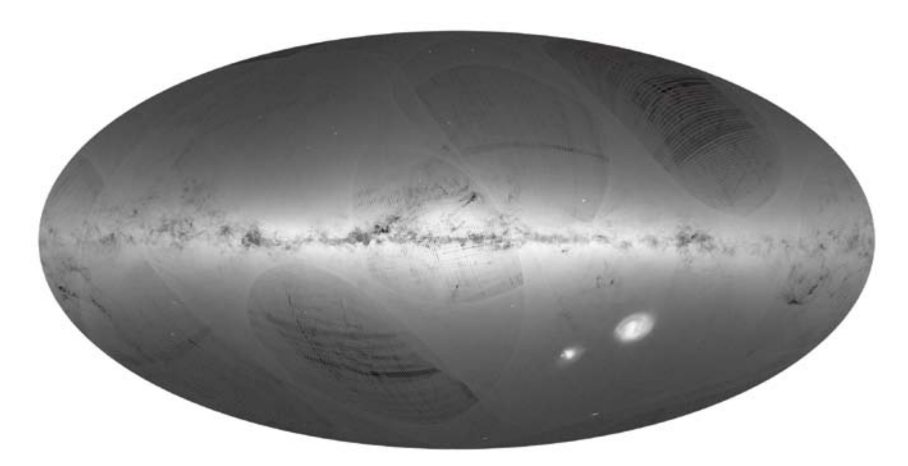
Al igual que cualquier misión espacial, la de Gaia comenzó a fraguarse mucho antes de su lanzamiento. Las primeras ideas se gestaron a finales de los años noventa, tras el éxito del satélite Hipparcos. La misión se planteó a la ESA en el año 2000, se aprobó en 2001 y la construcción comenzó en 2005. La comunidad científica y tecnológica española ha desempeñado desde el principio un importante papel en todas las fases de la misión.

El satélite Gaia se encuentra situado a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra, en sentido opuesto al del Sol. Consta de dos telescopios con espejos principales de 1,45 metros por 0,5 metros, los cuales apuntan en direcciones del cielo separadas 106,5 grados. Antes de registrarse en los 106 chips del plano focal, la luz se refleja en otros cinco espejos. En conjunto, este montaje equivale a una cámara de un gigapíxel, la mayor que jamás se haya lanzado al espacio.

Los astros se observan de dos maneras: como imágenes puntuales, para

deducir su brillo y posición instantánea, y en forma de espectros, lo que permite deducir la velocidad con que se acercan o alejan de nosotros y sus propiedades físicas. De esta manera podemos saber de qué objeto se trata (estrellas, núcleos galácticos, cuásares...) y, en el caso de las estrellas, cuáles son su composición química, temperatura y edad.

Gaia gira alrededor de su propio eje al ritmo de una revolución cada 6 horas. Los objetos celestes se observan con el primer telescopio y, al cabo de 1,8 horas, con el segundo. Pasadas otras 4,2 horas, los astros vuelven a aparecer en el primero, aunque no exactamente en la misma posición. Ello se debe a que el eje del instrumento ejecuta un movimiento similar al de una peonza, por lo que el campo de visión de los telescopios se desplaza ligeramente en cada revolución. Combinado con el movimiento anual alrededor del Sol, todo ello permite que Gaia observe el cielo completo en unos seis meses.



PRIMER MAPA ESTELAR: El primer catálogo estelar de la misión Gaia, publicado hace unos meses, ya ha dado lugar a más de 50 publicaciones en revistas científicas. Esta imagen reproduce la bóveda celeste a partir de los datos obtenidos hasta ahora por Gaia. Las zonas más brillantes corresponden a las regiones con mayor densidad de estrellas. Se aprecian con claridad las altas densidades del disco galáctico (*franja central*), las nubes de Magallanes (galaxias enanas cercanas a la Vía Láctea, *parte inferior derecha*), así como varios cúmulos globulares y otras galaxias cercanas. Las zonas oscurecidas se deben al polvo interestelar, cuya presencia impide detectar estrellas en la franja visible del espectro.

ESA/GAIA/CONSORCIO DE ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE DATOS (DPAC)

El satélite analiza unos 70 millones de objetos al día a partir de un total de 640 millones de imágenes puntuales y 170 millones de espectros, lo que supone enviar a la Tierra unos 40 gigaoctetos de datos diarios. Durante los 5 años de misión científica, cada objeto celeste se observará, en promedio, unas 70 veces.

Justo después del lanzamiento se detectaron algunos comportamientos indeseados, como la presencia de luz parásita debida a la difracción de la luz solar en los bordes del parasol y el empañamiento de los espejos. Sin embargo, también se constató que el conjunto formado por los espejos y la cámara era más sensible de lo esperado. Las operaciones de a bordo y el procesamiento de datos en tierra se rediseñaron para adaptarlos a las condiciones reales de Gaia, por lo que el éxito de la misión no se halla en entredicho por tales anomalías.

El primer catálogo estelar

Los primeros 14 meses de observaciones científicas sirvieron para confeccionar un primer mapa con la posición y el brillo de 1143 millones de estrellas; la distancia y el movimiento sobre la bóveda celeste de 2 millones de ellas, así como la serie temporal de 3200 estrellas de brillo variable. El hecho de que solo se publicasen las distancias y movimientos para un subconjunto de objetos se debe a la brevedad del período de observación: tras solo 14 meses, no resulta posible discernir entre el movimiento propio de una estrella y el inducido por la órbita de Gaia alrededor del Sol. La información proporcionada en su día por la misión Hipparcos permitió solventar este inconveniente para esos 2 millones de estrellas.

Este primer conjunto de datos se hizo público en septiembre de 2016. La expectación de la comunidad científica fue tal que, solo en las primeras 24 horas, más de 11.000 usuarios extrajeron 22 teraoctetos de datos, el récord de todos los archivos publicados hasta ahora por la ESA.

Desde entonces, los datos de Gaia han dado lugar a más de 50 publicaciones en revistas científicas. Por citar solo algunos ejemplos, en el ámbito de la física estelar se ha descubierto la naturaleza binaria de algunas estrellas (algo de gran importancia, ya que en los sistemas binarios las masas pueden deducirse a partir de las propiedades orbitales), al tiempo que se ha descartado esa misma característica para otras. También se han derivado las distancias y los movimientos de varios cúmulos estelares en el disco de la galaxia (lo que permite poner a prueba los modelos teóricos de evolución estelar) y se ha determinado la distancia precisa a la que se hallan varias estrellas con planetas a su alrededor.

En lo que respecta a la estructura de la Vía Láctea, se han descubierto 13 nuevas «estrellas fugitivas» (eyectadas de un sistema doble después de que la compañera explotase en forma de supernova) y se han efectuado varios estudios sobre la rotación de la Vía Láctea y el halo galáctico. En este último se han descubierto varias estrellas con órbitas retrógradas, lo que indica que podrían constituir los restos de pequeñas galaxias engullidas por la nuestra. También se han obtenido resultados en el ámbito de la astronomía extragaláctica, principalmente sobre las nubes de Magallanes y algunos cuásares, los cuales constituyen la base para establecer el sistema de referencia de coordenadas celestes.

Pero las aplicaciones científicas de Gaia no acaban aquí. Conocer con precisión la posición de estrellas lejanas nos proporciona nuevas oportunidades para estudiar los planetas del sistema solar. Al saber con exactitud dónde se encuentra una estrella, podemos predecir cuándo y dónde se producirá su ocultación por parte de un planeta o un asteroide cercano. A su vez, ello permite estudiar la atmósfera del objeto a partir del espectro que esta absorbe cuando la estrella aparece y desaparece tras él.

Ese fue el caso de la estrella UCAC4 345-180315, ocultada por Plutón en julio de 2016. Las posiciones determinadas por Gaia —hechas públicas antes de que se diese a conocer el primer catálogo— permitieron predecir con una precisión de apenas 100 kilómetros desde qué lugares de la superficie terrestre se observaría la ocultación (con anterioridad a Gaia, ese margen de error era de unos 1500 kilómetros). Gracias a ello, las campañas observacionales pudieron planificarse de forma mucho más segura y eficaz.

En rigor, la primera publicación de datos de la misión tuvo lugar ya en 2014,

y correspondió a la detección de una supernova. En su observación diaria, Gaia detecta cuándo una estrella aumenta su brillo de forma notable. Dicho fenómeno puede deberse a una explosión de nova o supernova, al efecto de microlente gravitacional (cuando una estrella, planeta o agujero negro pasa por delante de otra estrella más lejana y desvía sus rayos de luz) o a violentas erupciones estelares. Tales casos se notifican de inmediato a la comunidad científica para que el fenómeno pueda seguirse desde tierra. Hasta finales de 2016, Gaia había comunicado 1800 alertas, la mayoría correspondientes a supernovas.

El futuro de Gaia

Los datos publicados hasta ahora no representan más que un pequeño avance de lo que Gaia nos ofrecerá en el futuro. En abril de 2018 dispondremos del mapa de posiciones (incluidas las distancias) y movimientos de más de mil millones de estrellas, así como su clasificación en tipos estelares. A esta segunda publicación le seguirán otras, cada cual más precisa y con mayor cantidad de información que la anterior. Una vez completada la misión, en 2019, el catálogo final se prevé que esté concluido para 2022. Las observaciones podrán extenderse otros cinco años (lo que permite el combustible de a bordo) si la ESA aprueba los fondos para mantener las operaciones.

Puesto que Gaia detecta todos los cuerpos celestes hasta el límite de brillo que marca su diseño, no solo observa estrellas, sino cualquier objeto de aspecto puntual. Ello abre la puerta a incontables aplicaciones científicas que van más allá del estudio de la Vía Láctea: entre ellas, numerosas cuestiones de física estelar; el estudio de la forma, composición y masa de los asteroides del sistema solar; la elaboración de un censo completo de exoplanetas en el entorno solar; la observación de estrellas individuales en galaxias cercanas; la determinación del movimiento del Sol con respecto a cuásares y galaxias; o los efectos de la relatividad general sobre la trayectoria de los rayos de luz.

Esperamos con impaciencia el futuro esperanzador que nos depara la próxima década gracias a las sucesivas publicaciones de Gaia. Sus datos prometen cambiar para siempre nuestra visión de la Vía Láctea y sus componentes y, con ello, ayudarnos a entender mejor la evolución del universo.

—Carme Jordi
—Eduard Masana
Colaboración Gaia
Instituto de Ciencias del Cosmos
Universidad de Barcelona
Instituto de Estudios Espaciales de Cataluña

PARA SABER MÁS

The Gaia mission. Colaboración Gaia en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 595, art. n.º A1, noviembre de 2016.
Gaia data Release 1 — Summary of the astrometric, photometric, and survey properties. Colaboración Gaia en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 595, art. n.º A2, noviembre de 2016.
Gaia data Release 1 — Astrometry: One billion positions, two million proper motions and parallaxes. L. Lindegren et al. en *Astronomy & Astrophysics*, vol. 595, art. n.º A4, noviembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los fósiles de la Vía Láctea. Kathryn V. Johnston en *IyC*, febrero de 2015.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

El problema de la caja negra

El aprendizaje automático se está extendiendo tanto en el ámbito de la investigación básica como en el de la industria. Sin embargo, para que los científicos confíen en él, primero necesitan comprender qué hacen las máquinas

DAVIDE CASTELVECCHI

Dean Pomerleau aún recuerda su primera pelea con el problema de la caja negra. Corría el año 1991 y llevaba a cabo un intento pionero por conseguir algo que en la actualidad es común en el campo de la investigación sobre vehículos autónomos: enseñar a un ordenador a conducir.

Para ello se ponía al volante de un vehículo militar Humvee especialmente equipado y lo guiaba por las calles de la ciudad, explica Pomerleau, que por entonces cursaba un doctorado en robótica en la Universidad Carnegie Mellon. En el Humvee llevaba un ordenador que había programado para escrutar a través de una cámara, interpretar lo que ocurría en la calzada y memorizar cada movimiento que efectuaba como respuesta. Esperaba que, con el tiempo, la máquina establecería suficientes asociaciones para conducir por sí sola.

En cada viaje, Pomerleau entrenaba al sistema durante unos pocos minutos y luego lo soltaba para que prosiguiera solo. Todo parecía ir bien hasta que, un día, el coche se acercó a un puente y de repente viró bruscamente hacia un costado. El hombre evitó un accidente porque pudo agarrar rápidamente el volante y recuperar el control.

De vuelta en el laboratorio, Pomerleau trató de entender dónde se había equivocado el ordenador. «Una parte de mi tesis consistía en abrir la caja negra y averiguar qué estaba pensando», explica. Pero ¿cómo? Lo había programado para que actuara como una «red neuronal», un tipo de inteligencia artificial (IA) inspirada en el cerebro y que prometía comportarse mejor que los algoritmos estándar a la hora de lidiar con situaciones complejas del mundo real. Por desgracia, estas redes se muestran tan opacas como el cerebro. En lugar de almacenar lo que han aprendido en un bloque ordenado de memoria digital, esparcen la información de un modo que resulta sumamente difícil de descifrar. Descubrió la causa del error de conducción tras analizar exhaustivamente las respuestas del *software* a varios estímulos visuales: la red había utilizado la hierba que crecía al borde de las carreteras para determinar la dirección, de manera que la aparición del puente la había confundido.

Veinticinco años más tarde, el problema de la caja negra se ha tornado exponencialmente más difícil y urgente. La complejidad y las aplicaciones de la tecnología misma se han disparado. Po-

merleau, que en la actualidad imparte clases de robótica a tiempo parcial en Carnegie Mellon, describe su pequeño sistema como «la versión barata» de las enormes redes neurales que se implementan en las máquinas de hoy en día. Y la técnica del aprendizaje profundo, en la cual las redes se entrenan sobre archivos inmensos de datos, está encontrando aplicaciones comerciales que abarcan desde automóviles que se conducen solos hasta sitios web que recomiendan productos a los usuarios basándose en su historial de navegación.

Además, también promete invadir el mundo de la investigación científica. Los futuros observatorios de radioastronomía necesitarán el aprendizaje profundo para localizar señales que merezcan la pena entre cantidades de datos de otro modo inmanejables; los detectores de ondas gravitacionales lo emplearán para discernir y eliminar las fuentes de ruido más sutiles; y los editores lo usarán para rastrear y etiquetar millones de libros y artículos de investigación. Algunos investigadores creen que, con el tiempo, los ordenadores dotados de sistemas de aprendizaje profundo podrían incluso manifestar imaginación y creatividad. «Se aportarán datos a las máquinas y estas devolverán como respuesta las leyes de la naturaleza», augura Jean-Roch Vlimant, físico del Instituto de Tecnología de California.

Tales avances, sin embargo, podrían agudizar el problema de la caja negra. ¿Cómo encuentra una máquina exactamente esas valiosas señales? ¿Cómo se puede tener la certeza de que no se equivoca? ¿Hasta qué punto debería la gente estar dispuesta a confiar en el aprendizaje profundo? «Creo que, sin duda, estamos cediendo terreno ante estos algoritmos», observa Hod Lipson, de la Universidad de Columbia en Nueva York. Este especialista en robótica compara la situación con un hipotético contacto entre los humanos y una especie alienígena inteligente cuyos ojos no solo posean receptores de los tres colores primarios (rojo, verde y azul), sino también de un cuarto. Según Lipson, a nosotros nos resultaría difícil comprender cómo vería el mundo ese extraterrestre, y para él no sería fácil explicárnoslo. Los ordenadores tendrán dificultades similares para hacernos entender ciertas cosas, añade. «En algún momento, será como intentar explicarle Shakespeare a un perro.»

Ante tales desafíos, los investigadores de IA están respondiendo igual que hizo Pomerleau: abren la caja negra y aplican el equivalente a las neurociencias para entender las redes en su interior. Las respuestas no aportan conocimiento, declara Vincenzo Innocente, investigador del CERN y pionero en el empleo de la IA en la física de partículas. «Como científico, no me contento con distinguir a los gatos de los perros», afirma. «Un científico

¿SUEÑAN LAS INTELIGENCIAS ARTIFICIALES CON OVEJAS ELÉCTRICAS?

En un intento por comprender cómo codifican la información las redes neuronales, los investigadores han creado un algoritmo denominado Deep Dream («Sueño Profundo»).

Partiendo de una red entrenada para reconocer rostros de animales, Deep Dream le suministra una fotografía de, por ejemplo, una flor. A continuación, el algoritmo modifica repetidamente la imagen para maximizar las respuestas de facciones animales proporcionadas por la red.



CAPAS OCULTAS

La red consta de millones de unidades computacionales que se encuentran organizadas en docenas de capas y enlazadas mediante conexiones digitales. Durante su entrenamiento, se la provee de una extensa biblioteca de imágenes de referencia de animales y luego se ajustan las conexiones hasta que la respuesta final es correcta.

Capa

Neurona

Sinapsis

Una vez configurada, las unidades de los niveles inferiores responden por lo general a rasgos simples, como bordes, mientras que las capas intermedias reconocen formas complejas, y las últimas, rostros completos.



Tras varias iteraciones, la imagen de Deep Dream empieza a parecerse a una alucinación en la cual surgen rostros animales por doquier. Otras redes producirán imágenes en las que brotan ojos, edificios o frutas.

quiere poder decir: "la diferencia es esto o aquello".»

Buen viaje

Las primeras redes neuronales artificiales se crearon a principios de los años cincuenta del siglo xx, casi tan pronto como existieron ordenadores con capacidad de ejecutar los algoritmos correspondientes. La idea consiste en simular pequeñas unidades de computación, las «neuronas», que se encuentran organizadas en capas, las cuales se conectan entre sí mediante una multitud de «sinapsis» digitales. Cada unidad de la capa inferior recoge datos externos (como los píxeles de una imagen) y luego distribuye esa información a varias, si no a todas, de las unidades de la siguiente capa. A continuación, las unidades de la segunda capa integran las entradas recibidas de la primera, utilizando una regla matemática simple, y transmiten el resultado hacia los niveles superiores. Al final, la última capa genera una respuesta: por ejemplo, etiqueta la imagen original como «perro» o «gato».

La potencia de este tipo de redes nace de su capacidad para aprender. Dado un conjunto de datos de entrenamiento acompañados de sus respectivas respuestas, pueden mejorar su rendimiento de forma gradual ajustando los pesos de cada conexión hasta que las salidas en el nivel superior sean las correctas. Este proceso, que simula el modo en que el cerebro aprende mediante el fortalecimiento o el debilitamiento sináptico, produce con el tiempo una red capaz de clasificar con éxito datos nuevos que no formaban parte de su conjunto de entrenamiento.

Esa facultad para aprender supuso un importante atractivo para los físicos del CERN en los años noventa del siglo xx, época en la que se contaban entre los primeros científicos que emplearon redes neuronales a gran escala de manera rutinaria. Más tarde, las redes resultarían ser de gran ayuda para reconstruir las trayectorias de la metralla subatómica procedente de las colisiones de partículas en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC).

Sin embargo, este método de aprendizaje también constituye la razón por la cual la información se dispersa tanto en estos sistemas: al igual que en el cerebro, los recuerdos se hallan codificados en la intensidad de múltiples conexiones en vez de almacenarse en ubicaciones específicas, como sucede en una base de datos. «¿En qué punto del cerebro está guardado el primer dígito de su número de teléfono? Seguramente en un puñado de sinapsis, puede que no demasiado lejos de los demás dígitos», comenta Pierre Baldi, investigador en aprendizaje automático de la Universidad de California en Irvine. Pero no existe una secuencia bien definida de bits que codifique el número. Como consecuencia, «a pesar de que estas redes las construimos nosotros, no nos hallamos más cerca de comprenderlas que de entender el cerebro humano», declara el científico computacional de la Universidad de Wyoming Jeff Clune.

Lo anterior se traduce en que, para los científicos que han de enfrentarse a grandes volúmenes de datos en sus respectivas disciplinas, el aprendizaje profundo es una herramienta que debe usarse con precaución. Andrea Vedaldi, científico computacional de la Universidad de Oxford, explica por qué: imagínese que, en un futuro cercano, se entrena a una red neuronal de aprendizaje profundo a partir de mamografías antiguas que se han etiquetado en función de si la paciente terminó desarrollando un cáncer de mama. Tras el entrenamiento, la máquina podría «ver» como canceroso el tejido de una mujer en apariencia sana. «La red neuronal podría haber aprendido implícitamente a reconocer marcadores, ciertas características que no conocemos pero que son predictivas del cáncer».

No obstante, Vedaldi cree que, en el caso de que la máquina no pudiera explicar cómo lo ha sabido, se plantearían serios dilemas a médicos y pacientes. Para una mujer ya resulta bastante difícil acceder a practicarse una mastectomía preventiva por poseer una variante genética que se sabe que aumenta de forma notable el riesgo de cáncer [*véase* «Los riesgos de las mamografías», por Alexandra Barratt; Investigación y Ciencia, febrero de 2016]. Pero sería mucho más complicado tomar esa decisión sin siquiera conocer el factor de riesgo, aun cuando la máquina que la recomienda hubiera demostrado ser muy precisa en sus predicciones.

«El problema radica en que el conocimiento se cuece en el interior de la red, no en nosotros», advierte Michael Tyka, biofísico y programador de Google en Seattle.

Diversos grupos empezaron a estudiar el problema de la caja negra en 2012. Un equipo dirigido por Geoffrey E. Hinton, especialista en aprendizaje automático de la Universidad de Toronto, participó en un concurso de visión artificial y demostró por primera vez que la capacidad del aprendizaje profundo para clasificar fotografías de una base de datos que contenía 1,2 millones de imágenes superaba con creces la de cualquier otra técnica de IA.

Para profundizar en cómo lo consiguió, el grupo de Vedaldi tomó los algoritmos que Hinton había desarrollado para mejorar el entrenamiento de la red neuronal y, en esencia, los ejecutó a la inversa. En lugar de enseñar a una red a interpretar una imagen, el equipo empezó con redes ya entrenadas e intentó reconstruir los datos que se habían empleado para configurarlas. Ello sirvió para que los investigadores identificaran la manera en que el ordenador representaba distintas funciones; como si preguntaran a una red neuronal programada para detectar cáncer: «¿Qué parte de esta mamografía has determinado que es un marcador de riesgo?».

En 2015, Tyka y sus compañeros de investigación de Google siguieron un enfoque similar hasta su conclusión. Su algoritmo, al que denominaron Deep Dream («Sueño Profundo»), comienza con una imagen (por ejemplo, una flor o una playa) y la modifica para incrementar la respuesta de una determinada neurona de nivel superior. Si la neurona tiende a etiquetar fotografías como aves, por ejemplo, la imagen modificada empezará a mostrar pájaros por todas partes. Las imágenes resultantes evocan viajes de LSD, con aves que brotan de rostros, edificios y muchos otros objetos. «Creo que se parece más a una alucinación» que a un sueño, observa Tyka, que también tiene una faceta artística. Cuando él y el equipo advirtieron el

potencial del algoritmo para fines creativos, liberaron el código para que cualquiera pudiera descargarlo. En cuestión de días, Deep Dream se convirtió en un fenómeno viral.

Utilizando técnicas capaces de maximizar la respuesta de cualquier neurona, no solo las de nivel superior, el equipo de Clune descubrió en 2014 que el problema de la caja negra podría ser peor de lo esperado: es posible engañar con sorprendente facilidad a las redes neuronales con imágenes que una persona percibiría como ruido aleatorio o un patrón geométrico abstracto. Una red, por ejemplo, podría clasificar una serie de líneas como una estrella de mar o confundir rayas negras y amarillas con un autobús escolar. Es más, los patrones provocaban las mismas respuestas en redes que se habían entrenado sobre diferentes conjuntos de datos.

Los investigadores han propuesto una serie de estrategias para resolver el problema del «engaño», pero hasta el momento no se ha presentado ninguna solución de carácter general. En el mundo real, eso podría entrañar un peligro. Clune describe un escenario especialmente alarmante en el cual piratas informáticos malintencionados podrían aprender a explotar estas debilidades. Podrían desviar un vehículo autoconducido hacia una valla publicitaria que el sistema considere que es una carretera o engañar a un escáner de retina para que conceda acceso a la Casa Blanca a un intruso al que identifique erróneamente como el presidente de los Estados Unidos. «Tenemos que remangarnos y hacer ciencia pura y dura para conseguir que el aprendizaje automático sea más robusto e inteligente», concluye Clune.

Cuestiones como estas han llevado a algunos científicos de la computación a pensar que el aprendizaje profundo con redes neuronales no debería ser la única opción disponible. Zoubin Ghahramani, de la Universidad de Cambridge, señala que, si la inteligencia artificial ha de brindar respuestas fáciles de interpretar por los humanos, existe todo un mundo de problemas para los cuales el aprendizaje profundo no es la solución. En 2009, Lipson y el biólogo computacional Michael Schmidt, a la sazón en la Universidad Cornell, presentaron un método relativamente transparente con la capacidad de «hacer ciencia». El algoritmo, llamado Eureqa, demostró que podía volver a descubrir las leyes de la física newtoniana observando tan solo el movimiento de un objeto mecánico no demasiado complejo, como un sistema de péndulos.

Partiendo de una combinación aleatoria de operaciones y funciones matemáticas básicas como suma, resta, seno y coseno, Eureqa sigue un método de ensayo y error inspirado en la evolución darwiniana para ajustar los términos hasta alcanzar las fórmulas que mejor describen los datos y, a continuación, propone experimentos para evaluar los modelos. Una de sus ventajas radica en la sencillez, afirma Lipson. «Un modelo generado por Eureqa tiene por lo general una docena de parámetros; una red neuronal, millones.»

En piloto automático

En 2015, Ghahramani publicó un algoritmo que automatiza todas las tareas de un científico de datos, desde la observación de los datos en bruto hasta la elaboración de un artículo. Su programa, denominado Automatic Statistician («Estadístico Automático»), detecta tendencias y anomalías en los conjuntos de datos y presenta sus conclusiones, además de brindar una explicación detallada de su razonamiento. Según Ghahramani, esta transparencia no solo resulta «absolutamente fundamental» para las aplicaciones científicas, sino que también reviste importancia en numerosas aplicaciones comerciales. Por ejemplo, en muchos países los bancos que niegan un préstamo tienen la obligación legal de especificar los motivos, algo que probablemente un algoritmo de aprendizaje profundo se vería incapaz de hacer.

Preocupaciones similares asaltan a una amplia variedad de instituciones, indica Ellie Dobson, directora científica de datos de la empresa Arundo Analytics, en Oslo. Si algo saliera mal como consecuencia de fijar los tipos de interés del Reino Unido, «el Banco de Inglaterra no podría escudarse en que “lo determinó la caja negra”».

A pesar de esos temores, los científicos computacionales sostienen que los trabajos destinados a crear una IA transparente deben considerarse un complemento del aprendizaje profundo, no un sustituto. Varias técnicas transparentes podrían funcionar bien en los problemas que ya se han descrito como un conjunto de hechos abstractos, pero aseguran que no son tan eficaces en lo que se refiere a la percepción (el proceso de extraer hechos a partir de datos en bruto).

En última instancia, estos investigadores alegan que las complejas respuestas proporcionadas por el aprendizaje automático deben formar parte de la caja de herramientas científicas, ya que el mundo real es complejo: para fenómenos como el tiempo atmosférico o el mercado de valores, puede que no exista siquiera una descripción reduccionista y sintética. «Hay cosas imposibles de verbalizar», advierte Stéphane Mallat, matemático de la Escuela Politécnica de París. «Cuando uno le pregunta a un médico por qué le ha diagnosticado esto o lo otro, le dará una razón. Pero ¿por qué se tarda veinte años en llegar a ser buen médico? Porque la información no se encuentra solo en los libros.»

En opinión de Baldi, los científicos deberían aceptar el aprendizaje profundo sin mostrarse «demasiado quisquillosos» acerca de la caja negra. A fin de cuentas, todos ellos llevan una caja negra en la cabeza. «Uno usa el cerebro a todas horas; confía en él todo el tiempo, pero no tiene la menor idea de cómo funciona.»

—Davide Castelvecchi
Periodista de la revista Nature
y colaborador de Scientific American

Artículo original publicado en *Nature* vol. 538, págs. 20-23, 2016.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2016

Con la colaboración de nature

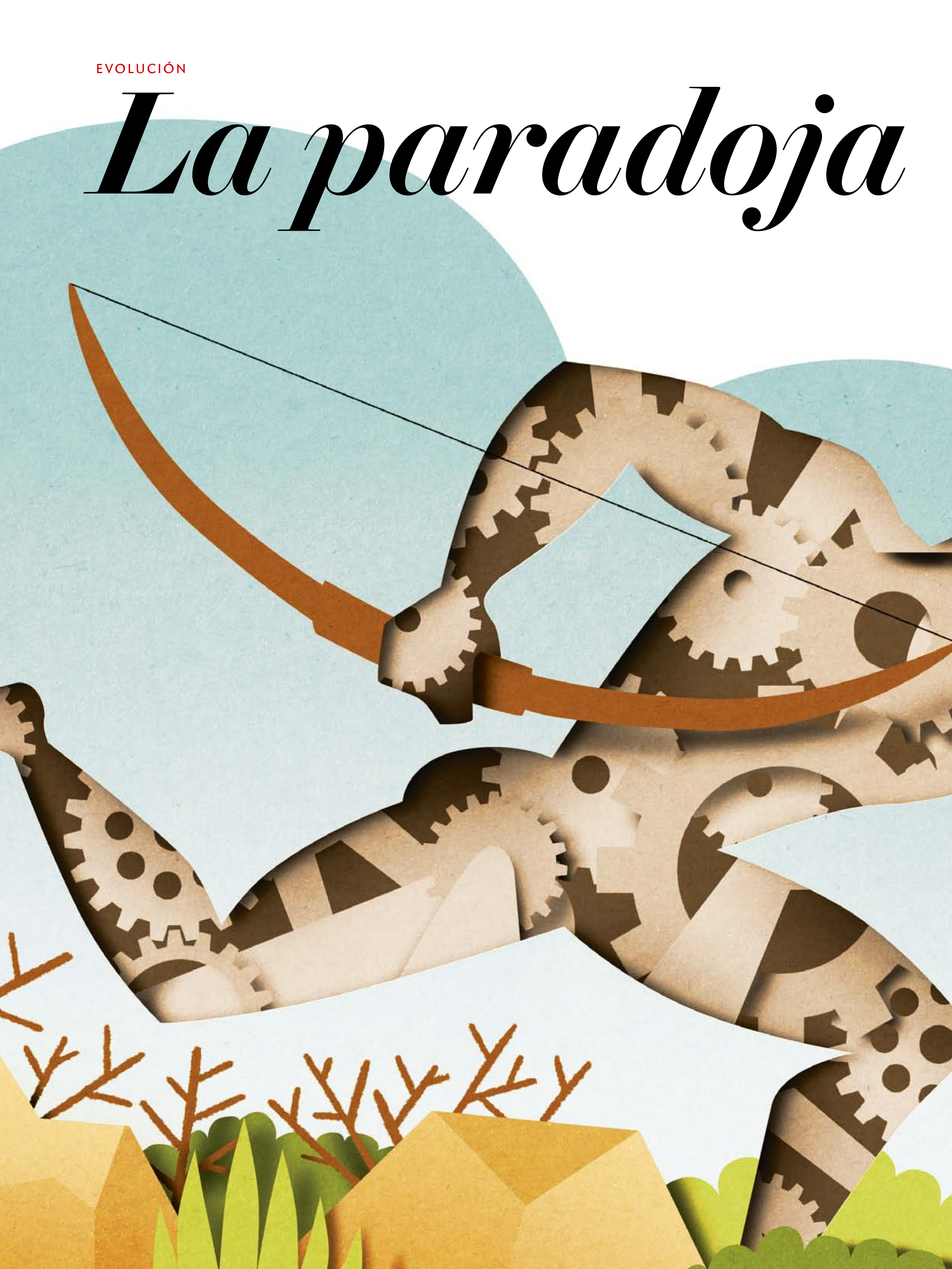
PARA SABER MÁS

ImageNet classification with deep convolutional neural networks. A. Krizhevsky, I. Sutskever y G. E. Hinton en *Advances in Neural Information Processing Systems 25*, págs. 1097-1105, 2012.
Understanding deep image representations by inverting them. A. Mahendran y A. Vedaldi. Disponible en **http://arxiv.org/abs/1412.0035**, 2014.
Deep neural networks are easily fooled: High confidence predictions for unrecognizable images. A. Nguyen, J. Yosinski y J. Clune. Disponible en **https://arxiv.org/abs/1412.1897**, 2014.
Probabilistic machine learning and artificial intelligence. Z. Ghahramani en *Nature*, vol. 521, págs. 452-459, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

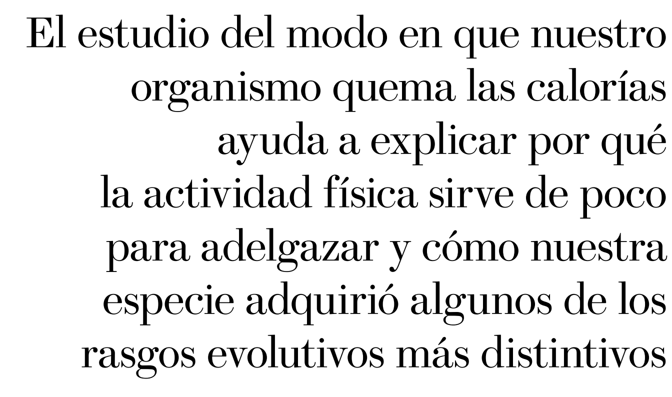
Redes neuronales que aprenden de la experiencia. Geoffrey E. Hinton en *IyC*, noviembre de 1992.
Técnicas de aprendizaje automatizado. Y. S. Abu-Mostafa en *IyC*, abril de 2013.
Aprendizaje profundo. Yoshua Bengio en *IyC*, agosto de 2016.

La paradoja





del ejercicio físico



El estudio del modo en que nuestro organismo quema las calorías ayuda a explicar por qué la actividad física sirve de poco para adelgazar y cómo nuestra especie adquirió algunos de los rasgos evolutivos más distintivos

Herman Pontzer

EN SÍNTESIS

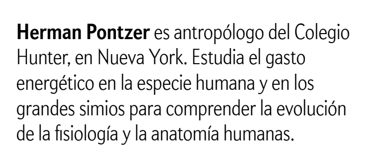
Una hipótesis arraigada sostiene que las personas activas consumen más calorías que las sedentarias.

Pero diversos estudios revelan que los cazadores-recolectores tradicionales, cuya vida cotidiana es físicamente agotadora, queman el mismo número de calorías que las personas que disfrutan de las comodidades modernas.

El descubrimiento de que el gasto energético humano se halla muy restringido plantea incógnitas sobre el modo en que pudo surgir nuestro cerebro voluminoso y otros rasgos de elevado coste energético.

Las comparaciones con el gasto energético de los grandes simios indican que el metabolismo humano ha ganado en rendimiento con el fin de sustentar nuestros costosos atributos.

Herman Pontzer es antropólogo del Colegio Hunter, en Nueva York. Estudia el gasto energético en la especie humana y en los grandes simios para comprender la evolución de la fisiología y la anatomía humanas.



Ni rastro. Llevábamos medio día tras las huellas de una jirafa herida a la que Mwasad, un indígena bien entrado en los treinta, había disparado la víspera. Desde una veintena de metros la había alcanzado en la base del cuello con una flecha de punta metálica untada con un potente veneno casero. Miembro de la tribu de cazadores-recolectores de los hadza, habitantes de la sabana árida del norte de Tanzania, Mwasad y los suyos conocen el entorno y sus moradores mucho mejor que usted el supermercado de la esquina. Dejó que la jirafa huyera para que la ponzoña surtiera efecto, con la esperanza de hallarla muerta a la mañana siguiente. Una presa de esa talla alimentaría a su familia y a todo el poblado durante una semana, siempre que lograra dar con ella.

Mwasad encabezaba la partida de caza que al alba salió del campamento; le acompañábamos Dave Raichlen, de la Universidad de Arizona, un mozalbete de 12 años llamado Neje y quien escribe. Dave y yo seríamos de poca ayuda en la tarea. Nos había invitado como gesto de amistad y por contar con cuatro brazos más para acarrear la presa despedazada hasta el campamento si la batida culminaba con éxito. Como antropólogos vivamente interesados en la ecología y la evolución humanas, no lo pensamos dos veces ante la oportunidad que se nos brindaba; no en vano las dotes de rastreo de los hadza son legendarias. Sin duda era mejor que la perspectiva de pasar la larga jornada trasteando con el equipamiento científico en el campamento.

Caminamos a marchas forzadas durante una hora entre un mar de hierba dorada y alta hasta la cintura, salpicado aquí y allá por matorrales y acacias espinosas, derechos hacia la mancha de sangre dejada por la jirafa. Recorrer ese tramo era ya una soberbia muestra de orientación, como si alguien le condujera a uno hasta la mitad de un trigal de 400 hectáreas para mostrarle el lugar donde había tirado un mondadientes y, con toda naturalidad, se agachara para recogerlo. Bajo un sol inclemente, las horas se fueron desgranando en pos de la presa herida, mientras seguíamos pistas aún más sutiles.

Ni rastro de la jirafa aún. Al menos me quedaba agua. Recién pasado el mediodía, nos sentamos a la sombra de unos arbustos para descansar mientras Mwasad rumiaba hacia adónde podía haber ido la pieza herida. Me quedaba todavía un litro, más o menos; lo bastante, supuse, para soportar el calor de la tarde. En cambio, Mwasad no llevaba agua consigo, como es costumbre entre los suyos. Cuando rehicimos la mochila para reanudar la marcha, le ofrecí un trago. Me miró de zaino, sonrió y la apuró de una larga sentada. Al acabar, como si nada, me devolvió la botella vacía.

Me lo merecía. Dave y yo, junto con Brian Wood, antropólogo de la Universidad Yale, habíamos convivido todo el mes con los hadza para llevar a término las primeras mediciones directas del gasto energético diario en una tribu de cazadores-recolectores. Logramos convencer a un par de docenas de hombres y mujeres de la tribu, entre ellos a Mwasad, para que bebieran pequeñas pero exorbitantemente caras botellas de agua enriquecida con dos isótopos raros: deuterio y oxígeno 18. Analizando la concentración de ambos isótopos en las muestras de orina de los participantes podríamos calcular su tasa diaria de producción de dióxido de carbono y deducir de ella su gasto diario de energía. Este proceder, llamado método del agua con marcaje doble, es la prueba de referencia en salud pública para medir las calorías consumidas en las actividades cotidianas. El método es sencillo, totalmente seguro y preciso, pero requiere que los probandos beban hasta la última gota de agua enriquecida. Nos costó horrores hacerles entender que no podían derramarla y que tenían que apurar la dosis por completo. Sin duda Mwasad estaba aplicando la lección a rajatabla.

Dejando a un lado la socarronería de Mwasad, en nuestro experimento con los hadza hemos aprendido muchísimo acerca del modo en que el cuerpo humano quema las calorías. Sumados a los hallazgos de algunos investigadores que estudian otras poblaciones, nuestro trabajo ha revelado algunos detalles sorprendentes del metabolismo humano. Nuestros datos indican que, en contra de la idea arraigada, el ser humano tiende a quemar el mismo número de calorías sea cual sea la intensidad de la actividad física. Eso sí, hemos evolucionado para quemar una cantidad notablemente mayor de energía que nuestros parientes los primates. Tales resultados contribuyen a explicar dos enigmas que a primera vista pueden parecer dispares pero que, en realidad, están vinculados: primero, por qué el ejercicio no suele ayudarnos a adelgazar y, segundo, cómo surgieron algunos rasgos singulares de nuestra especie.

LA ECONOMÍA DE LAS CALORÍAS

Los investigadores interesados en la evolución y la ecología humanas se centran a menudo en el gasto energético porque en biología la energía resulta primordial para casi todo. Es mucho lo que se aprende de una especie midiendo su metabolismo: la vida, en esencia, es un juego que consiste en transformar la energía en progenie, donde cada rasgo es mejorado por la selección natural para maximizar el rendimiento de cada caloría invertida. Lo ideal es que la población estudiada viva en el mismo tipo de ambiente en que nació la especie, donde imperen las mismas presiones

ecológicas que modelaron su biología en el origen. Esa pretensión es difícil en nuestro caso, puesto que la gran mayoría de nosotros ya no hemos de dedicarnos a la tarea diaria de buscar el sustento en plena naturaleza. Sin embargo, en la mayor parte de los últimos dos millones de años, la especie humana y sus ancestros han sobrevivido gracias a la recolección y la caza. La agricultura nació hace unos 10.000 años, y las ciudades industriales y la técnica moderna se originaron solo unas cuantas generaciones atrás. Los colectivos como los hadza, una de las últimas tribus de cazadores-recolectores que sobrevive en el mundo, son preciosos para entender cómo funcionaba nuestro organismo antes de que contáramos con vacas, automóviles u ordenadores.

El día a día de la tribu exige estar en buena forma física. Cada mañana las mujeres salen de sus chozas en grupos pequeños, algunas con los bebés colgados a la espalda en un trapo, en busca de bayas silvestres y otros comestibles que hallan en la naturaleza. Los tubérculos son un elemento básico de su régimen alimentario, por lo que pasan horas escarbando con palos en el suelo pedregoso para dar con ellos. Los varones caminan cada día kilómetros provistos de arcos y flechas que fabrican ellos mismos. Cuando la caza escasea, se sirven de hachas rudimentarias para cortar ramas de las copas de los árboles y abrirse paso hasta panales de miel, situados con frecuencia a más de diez metros del suelo. Hasta los niños colaboran acarreando baldes de agua desde el aguadero más cercano, a veces a más de un kilómetro del campamento. Bien entrada la tarde, todos regresan, se sientan en el suelo y charlan en torno a pequeñas fogatas donde cocinan y reparten lo recolectado esa jornada, además de ocuparse de los niños. Y así transcurren los días de la estación seca y los de la lluviosa, por los siglos de los siglos.

Pero olvidemos toda visión romántica del paraíso perdido. La caza y la recolección son actividades peligrosas que demandan sagacidad y destreza, un juego arriesgado en el que las fichas son las calorías y el fiasco absoluto comporta la muerte. Los hombres como Mwasad invierten cada día cientos de miles de calorías en el rastreo y la caza, en una apuesta que esperan recuperar con creces. La inteligencia es tan esencial como la resistencia física. Mientras otros depredadores confían en la velocidad y la fuerza para atrapar a su presa, el ser humano tiene que ser más astuto, conocer sus hábitos y peinar el terreno en busca de pistas que delaten su presencia. Aun así, como norma, los hadza no suelen conseguir trofeos de caza mayor como la jirafa más de una vez al mes. Morirían de hambre si las mujeres no practicasen una estrategia complementaria pero igualmente ardua, en que recurren a su saber enciclopédico sobre la flora autóctona para traer cada jornada a casa una provisión de víveres fiable. Esa búsqueda de alimento, compleja y cooperativa, explica el asombroso éxito biológico de la especie humana y constituye la esencia de su singularidad.

Los investigadores de salud pública y evolución humana suponían desde hacía tiempo que nuestros ancestros cazadores-recolectores quemaban más calorías que los habitantes de los pueblos y ciudades actuales. A la vista de la dura vida que llevan ciertos colectivos humanos como los hadza, parece imposible concebir otra idea. Numerosos especialistas en salud pública incluso llegan a sostener que esa reducción en el gasto energético diario, y la consiguiente acumulación de todas las calorías sobrantes en forma de grasa, es la causa de la pandemia de obesidad que azota al mundo desarrollado. Uno de los motivos por los que quisimos medir el metabolismo de los hadza era averiguar la magnitud de esa reducción y ver lo cortos que nos quedábamos los occidentales en nuestro gasto diario. De regreso a Estados Unidos, después de haber soportado una estación tórrida y polvorienta a la intemperie, embalé con esmero los viales de orina de los indígenas en hielo carbónico y los remití al Colegio Baylor de Medicina, sede de uno de los mejores laboratorios del país especializados en agua con marcaje doble, mientras imaginaba las elevadísimas cantidades de calorías consumidas que revelarían.

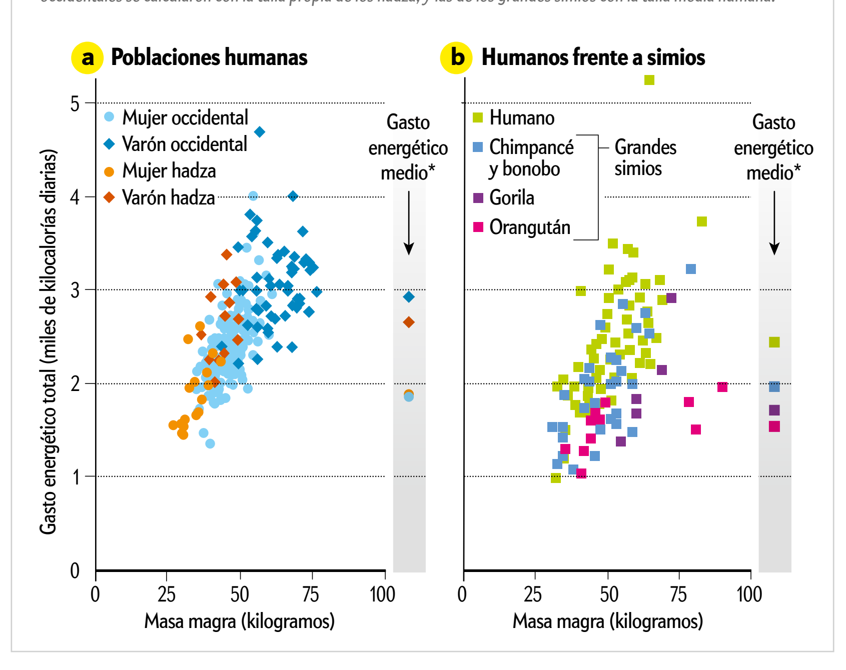
Pero algo curioso debió suceder en el trayecto hasta el espectrómetro de masas de relaciones isotópicas, pues según los

HALLAZGOS

Consumidores voraces

Los expertos suponían que las personas físicamente activas quemaban más calorías que las sedentarias. Pero las mediciones directas del gasto energético en las tribus de cazadores-recolectores que aún perviven en algunos países y en las poblaciones comparativamente sedentarias de EE.UU. y Europa revelan resultados similares **a**. Si el metabolismo humano está controlado con tanto rigor, ¿cómo pudimos adquirir un gran cerebro, nuestra longevidad y otros caracteres de elevado coste energético que nos diferencian de nuestros parientes cercanos? Los humanos ingerimos y gastamos cada día cientos de miles de calorías más que los grandes simios **b**, lo cual apunta a que nuestro metabolismo cambió para quemar energía más rápidamente y poder sustentar así nuestros costosos atributos.

**Para tener en cuenta las diferencias en el gasto energético derivadas de la talla corporal, las medias de los individuos occidentales se calcularon con la talla propia de los hadza, y las de los grandes simios con la talla media humana.*



FUENTES: «HUNTER-GATHERER ENERGETICS AND HUMAN OBESITY», POR HERMAN PONTZER ET AL., EN *PLOS ONE*, VOL. 7, Nº. 7, ART. E40503, 25 DE JULIO DE 2012 (*izquierda*); «METABOLIC ACCELERATION AND THE EVOLUTION OF HUMAN BRAIN SIZE AND LIFE HISTORY», POR HERMAN PONTZER ET AL., EN *NATURE*, VOL. 533, 19 DE MAYO DE 2016 (*derecha*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

resultados de los análisis de Baylor, los hadza no eran distintos de los demás. Los hombres de la tribu ingerían y quemaban unas 2600 kilocalorías diarias y las mujeres unas 1900; lo mismo que los adultos de Estados Unidos o Europa. Examinamos los datos de todas las formas concebibles, barajando los efectos de la talla corporal, el porcentaje de grasa, la edad o el sexo. Ninguna diferencia. ¿Cómo era posible? ¿Qué estábamos pasando por alto? ¿En qué aspectos de la biología y la evolución humanas nos habíamos equivocado?

MI PULSERA DE EJERCICIO ME MIENTE

Parece tan obvio e irrebatible que la gente físicamente activa consume más calorías que lo aceptamos como un axioma, sin gran reflexión crítica ni datos que lo demuestren. Pero desde los años ochenta y noventa del siglo pasado, con la aparición del método del agua con marcaje doble, los datos empíricos a menudo han puesto en tela de juicio esa idea tan arraigada en el ámbito de la salud pública y la nutrición. Por extraño que parezca, el resultado de los hadza no puede considerarse un chaparrón caído de un cielo inmaculado, sino el primer goterón que resbala por nuestra nuca y nos anuncia una tormenta que se había ido gestando durante años pero que habíamos ignorado.

Los primeros estudios con agua doblemente marcada, llevados a cabo en campesinos tradicionales de Guatemala, Gambia y Bolivia, revelaron que su gasto energético se asemejaba a grandes rasgos al de los habitantes urbanos. En un trabajo publicado en 2008, Amy Luke, especialista en salud pública de la Universidad Loyola de Chicago, llevó esas investigaciones un paso más allá y comparó el gasto energético y la actividad física de campesinas nigerianas con los de mujeres de raza negra de esa gran urbe estadounidense. A semejanza del estudio de los hadza, tampoco halló diferencias en el gasto energético diario entre ambos colectivos, pese a las grandes diferencias en el nivel de actividad. Siguiendo los pasos de ese trabajo, Lara Dugas, de la misma universidad, junto con Luke y otros, analizaron datos procedentes de 98 estudios de todo el mundo y demostraron que las poblaciones mimadas por las comodidades del mundo moderno presentaban gastos energéticos similares a los de países menos desarrollados, de vida más ajetreada.

Los humanos no somos la única especie con una tasa fija de gasto energético. En la senda marcada por el estudio de los hadza, coordiné un gran esfuerzo colaborativo para cuantificar el gasto energético diario en los primates, el grupo de mamíferos que engloba los lémures, monos y simios y el género humano. Descubrimos que los primates criados en cautividad en laboratorios y zoológicos gastan cada día el mismo número de calorías que sus congéneres en libertad, a pesar de las claras diferencias en su actividad física. En 2013, investigadores australianos hallaron gastos calóricos similares en ovejas y canguros confinados en corrales pequeños y en los que campaban a sus anchas. Y en 2015, un equipo chino notificó valores de gasto parecidos en los pandas gigantes de zoológicos y los que vivían en libertad.

Para obtener una visión más detallada y comparar medias individuales en lugar de colectivas, me incorporé recientemente al equipo de Luke, del que también forma parte Dugas, para examinar la actividad y el gasto energético en un gran análisis de varios años titulado Estudio de Modelización de la Transición Epidemiológica (METS, por sus siglas en inglés). Más de 300 participantes accedieron a llevar puestos las 24 horas del día acelerómetros parecidos a las pulseras de ejercicio físico durante una semana entera, mientras su gasto energético diario se medía con el agua con marcaje doble. Comprobamos que la actividad cotidiana, monitorizada con los acelerómetros, no guardaba una estrecha relación con el metabolismo. En promedio, los amantes del sofá quemaron unas 200 kilocalorías menos al día que las personas moderadamente activas, aquellas que practican algo de ejercicio durante la semana y se esfuerzan en subir por las escaleras. Pero, más importante aún, el gasto energético se estabilizó con los mayores niveles de actividad: las personas con una vida cotidiana muy activa quemaban el mismo número de calorías diarias que aquellas con un tren de vida moderado. El mismo fenómeno que mantenía el gasto energético de los hadza en línea con el de otras poblaciones era evidente ahora en los individuos del estudio.



LOS INDÍGENAS HADZA, una tribu de cazadores-recolectores de Tanzania, gastan cientos de miles de calorías en sus actividades cotidianas, pero queman el mismo total de calorías diarias que los habitantes de cualquier ciudad del mundo.

HARRY HOOK, GETTY IMAGES

¿Cómo se adapta el cuerpo a la actividad intensa para que el gasto energético diario no se dispare? ¿Cómo es posible que los hadza consuman cientos de miles de calorías en sus quehaceres cotidianos, pero acaben quemando la misma cantidad al día que los sedentarios ciudadanos de EE.UU. y Europa? Aún no estamos seguros, pero el coste de la actividad en sí misma no cambia: sabemos, por ejemplo, que un adulto de la tribu quema las mismas calorías para caminar un kilómetro que un occidental. Tal vez la gente con niveles elevados de actividad modifique su comportamiento sutilmente para ahorrar energía, sentándose en lugar de permanecer en pie o durmiendo más profundamente. Pero nuestro análisis de los datos del estudio METS sugiere que, si bien esos cambios de comportamiento quizá contribuyan, no bastan para explicar en su totalidad la constancia observada en el gasto energético diario.

Otra posibilidad intrigante es que el organismo deje margen para ese coste adicional de la actividad y recorte las calorías invertidas en otras muchas tareas que pasan inadvertidas y que se llevan la mayor parte de nuestra provisión diaria de energía: las tareas «domésticas» que nuestras células y nuestros órganos llevan a cabo para mantenernos vivos. El ahorro energético en ese tipo de procesos concedería un margen más amplio a nuestra provisión diaria y nos permitiría destinar mayor cantidad a la actividad física sin aumentar el total de calorías consumido por día. Por ejemplo, el ejercicio suele reducir la actividad inflamatoria desatada por el sistema inmunitario, así como los niveles de hormonas reproductoras como los estrógenos. En animales de laboratorio, la intensificación del ejercicio no altera el gasto energético diario, pero da lugar a un menor número de ciclos ovulatorios y ralentiza la reparación de los tejidos. Y, en situa-

ciones extremas, algunos animales llegan a devorar a sus crías recién nacidas. Los humanos y otros animales parecen haber desarrollado estrategias para limitar el gasto energético diario.

Todo ese cúmulo de indicios señala a la obesidad como un trastorno fruto del vicio de la gula más que de la pereza. Uno engorda cuando el número de calorías que ingiere supera al de las calorías que quema. Si en el curso de la evolución humana el gasto energético diario no ha variado, el principal culpable de la presente pandemia de obesidad debe de ser las calorías ingeridas. Nada nuevo bajo el sol. Un viejo dicho en salud pública afirma que no hay manera de contrarrestar la mala alimentación, y los expertos saben por experiencia y por cuantiosos datos que ir al gimnasio es una pérdida de tiempo si el fin perseguido es adelgazar. Pero los nuevos hallazgos ayudan a explicar por qué el ejercicio físico no es un buen remedio para perder peso. No es que no pongamos afán suficiente, es que el cuerpo conspira contra nosotros desde el principio.

Así y todo, practicar ejercicio resulta necesario. Este artículo no pretende servir de excusa para no asistir a la clase de gimnasia. El ejercicio tiene multitud de virtudes probadas, como un corazón más sano y un sistema inmunitario reforzado, o un cerebro más ágil y una vejez más saludable [*véase* «Los beneficios del ejercicio», por Shari S. Bassuk, Timothy S. Church y JoAnn E. Manson; Investigación y Ciencia, febrero de 2014]. De hecho, sospecho que la adaptación metabólica a la actividad física es una de las razones por las que el ejercicio es saludable, puesto que desvía energía destinada a otros procesos que, como la inflamación, acarrean consecuencias negativas si van demasiado lejos. De este modo, la inflamación crónica ha sido vinculada con las enfermedades cardiovasculares y los trastornos autoinmunitarios.

No cabe duda de que los alimentos que ingerimos influyen en nuestra salud, ni de que el ejercicio acompañado de cambios en la alimentación ayuda a mantener a raya esos kilos de más una vez que hemos alcanzado un peso saludable, pero los datos acumulados indican que es mejor pensar en la dieta y en la actividad física como en dos instrumentos con bondades distintas: el ejercicio, para mantenernos sanos y vigorosos; la dieta, para cuidar el peso.

PROVISIÓN ENERGÉTICA Y EVOLUCIÓN

Por mucho que los últimos avances en la comprensión de la adaptación metabólica contribuyan a esclarecer el vínculo entre el ejercicio físico y la obesidad, el metabolismo adaptativo y limitante deja a los especialistas con preguntas existenciales aún mayores, si cabe. Si el gasto energético diario es prácticamente inamovible, ¿cómo hemos llegado a ser tan distintos de nuestros parientes, los simios?

Nada en la vida es gratuito. Los recursos son limitados, por lo que invertir más en un carácter conlleva ineludiblemente invertir menos en otro. No es mera coincidencia que el conejo sea tan prolífico pero tenga una vida breve; toda esa inversión de energía en la procreación significa menos energía destinada al mantenimiento de las funciones corporales y la longevidad. *Tyrannosaurus rex* puede agradecer su enorme cabeza, sus fauces terroríficas y sus potentes extremidades traseras a sus enclenques brazos. Ni siquiera los dinosaurios podían aspirar a todo.

El ser humano incumple ese principio evolutivo básico de austeridad. Nuestro cerebro es tan voluminoso que, mientras usted permanece sentado leyendo este artículo, destina una cuarta parte del oxígeno que inspira a mantenerlo vivo. No solo eso: la especie humana engendra bebés más grandes, se reproduce con más frecuencia, vive más y es más activa físicamente que ninguno de los grandes simios que nos son afines. Los campamentos hadza bullen de niños felizmente alborotados y sanos y no escasean los hombres y las mujeres en su sexta o séptima década de vida, todavía vigorosos. Nuestra extravagancia energética supone un misterio evolutivo. Los humanos guardamos tal parecido genético y biológico con los simios antropomorfos que los investigadores han supuesto durante mucho tiempo que nuestro metabolismo era igualmente parecido. Pero si el gasto energético es objeto de un control tan riguroso, según indican nuestro estudio con los hadza y otras investigaciones, ¿cómo pudo un metabolismo simiesco y, como tal, inflexible, llegar a procesar todas las calorías necesarias para sustentar los costosos atributos humanos?

A raíz de nuestro amplio estudio comparativo sobre la energética de los primates, comenzamos a preguntarnos si el conjunto adaptativo de caracteres costosos fue impulsado por un gran cambio evolutivo en la fisiología metabólica humana. En dicho estudio hemos descubierto que los primates consumen a diario solo la mitad de calorías que otros mamíferos. Esa reducida tasa metabólica concuerda con su lento ritmo de crecimiento y reproducción. O, a la inversa, tal vez el mayor ritmo reproductivo y los demás caracteres costosos propios de los humanos estén vinculados con la aparición de una tasa metabólica acelerada. Todo lo que se necesita para comprobar esa idea consiste en intentar que un puñado de chimpancés frenéticos, bonobos astutos, orangutanes parsimoniosos y gorilas asustadizos beban con cuidado dosis de agua doblemente marcada sin derramarla y faciliten unas muestras de orina. En lo que supuso una hazaña científica, mis colegas Steve Ross y Mary Brown, del Parque Zoológico Lincoln de Chicago, trabajaron con los cuidadores y los veterinarios de más de una docena de zoológicos de todo EE.UU. para conseguirlo. Tardaron un par de años, pero acumularon datos suficientes sobre el gasto energético de los grandes simios para hacer posible una comparación sólida con nuestra especie.

No hay duda de que los humanos gastamos a diario más calorías que ninguno de nuestros parientes más cercanos. Aun después de tener en cuenta la influencia de la talla corporal, el grado de actividad y otros factores, cada día ingerimos y gastamos unas 400 kilocalorías más que los chimpancés y los bonobos; las diferencias que nos separan de los gorilas y los orangutanes son aún mayores. Esas calorías extra representan el trabajo adicional que el cuerpo ha de hacer para sustentar nuestro voluminoso cerebro, engendrar más bebés y mantener las funciones corporales durante más tiempo. No es solo que comamos más que los grandes simios, que lo es; como bien sabemos, acumular el exceso de calorías en un cuerpo que no está preparado para hacer uso de ellas solo nos condena a la obesidad. Nuestro organismo, hasta la misma escala celular, ha evolucionado para quemar energía con más rapidez y sacar mayor provecho que el de nuestros parientes primates.

Por suerte, la evolución humana no está exenta de compensaciones: nuestro aparato digestivo es más pequeño y más eficiente que el de los grandes simios, que precisan de un intestino largo y energéticamente costoso para digerir los vegetales ricos en fibra con que se nutren. Pero los cambios primordiales que nos hacen humanos parecen impulsados por un cambio evolutivo en nuestro metabolismo.

SUERTES COMPARTIDAS

Bien entrada la tarde, viramos hacia el campamento; Mwasad fijó la mirada al frente y dejó de husmear por el suelo. Regresá-

bamos a casa sin el trofeo. Aquí radicaba el gran peligro de la estrategia humana: volver a casa con las manos vacías resultaba lo más probable pero también lo más trascendental. Muchos de los alimentos calóricos que precisamos para mantener en funcionamiento nuestro metabolismo acelerado no son fáciles de obtener en la naturaleza, circunstancia que incrementa el coste energético de la búsqueda del sustento y acentúa el riesgo de inanición para los hombres y las mujeres que salen en su busca y para sus hijos que aguardan en el poblado.

Por suerte para Mwasad, los humanos han ideado unos cuantos trucos para mantener a raya el hambre. La nuestra es la única especie que ha aprendido a cocinar, proceso que aumenta el valor calórico de muchos alimentos y que facilita su digestión. Nuestro dominio del fuego convierte raíces vegetales incomibles (desde la mandioca del supermercado hasta los tubérculos silvestres recolectados por los hadza) en verdaderas bombas de almidón. También hemos evolucionado para ser gordos. Lo sabemos muy bien a raíz de la epidemia de obesidad que afecta a Occidente, pero hasta el cuerpo de los adultos hadza, delgados se mire como se mire, alberga el doble de grasa que los chimpancés que matan el tiempo en los zoológicos. Aunque resulte problemática en esta época en que vivimos, nuestra propensión a acumular grasa probablemente surgió en paralelo con la aceleración del metabolismo, como una reserva providencial para sobrevivir a los períodos de vacas flacas.

Llegamos al campamento cuando el sol, grande y anaranjado, descendía sobre las copas de los árboles. Dave y yo nos dirigimos a nuestras tiendas, y Mwasad y Neje a las chozas de sus familias, todos contentos de estar de vuelta en casa. A pesar del extravío de la jirafa, nadie se quedaría en ayunas aquella noche. Con menos fanfarria o esfuerzo consciente, el campamento movilizó el arma más ingeniosa y poderosa de nuestra especie contra el hambre: el acto de compartir. El reparto del sustento es tan consustancial con la condición humana, el punto en común de las barbacoas, las fiestas de aniversario o los banquetes nupciales, que no reparamos en ello, pero constituye un elemento singular y esencial de nuestra herencia evolutiva que otros simios no presentan.

Más allá de nuestras necesidades nutritivas y de la acumulación de grasa, quizás el impacto más profundo de nuestro consumo acelerado de energía es ese imperativo humano de trabajar en equipo. El metabolismo rápido entrelazó nuestros destinos e impuso la disyuntiva de cooperar o morir. Mientras permanecía sentado junto a Dave y a Brian recordando las peripecias de la jornada ante unas sardinas enlatadas y una bolsa de patatas fritas, fui consciente de que no las habría conseguido de otro modo. No hallar la jirafa no supuso ningún problema. IyC

PARA SABER MÁS

Hunter-gatherer energetics and human obesity. Herman Pontzer et al. en *PLOS ONE*, vol. 7, n.º 7, art. e40503, 25 de julio de 2012.

Constrained total energy expenditure and metabolic adaptation to physical activity in adult humans. Herman Pontzer et al. en *Current Biology*, vol. 26, n.º 3, págs. 410-417, 8 de febrero de 2016.

Metabolic acceleration and the evolution of human brain size and life history. Herman Pontzer et al. en *Nature*, vol. 533, págs. 390-392, 19 de mayo de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Incidencia de la dieta en la hominización. William R. Leonard en *IyC*, febrero de 2003.

El gen de la obesidad. Richard J. Johnson y Peter Andrews en *IyC*, febrero de 2016.

COSMOLOGÍA

LA BURBUJA *de la inflación cósmica*

LAS ÚLTIMAS MEDIDAS ASTRONÓMICAS, UNIDAS A PROBLEMAS DE CARÁCTER TEÓRICO, PONEN EN DUDA EL ARRAIGADO MODELO INFLACIONARIO DEL UNIVERSO PRIMITIVO Y PLANTEAN LA NECESIDAD DE NUEVAS IDEAS

Anna Ijjas, Paul J. Steinhardt y Abraham Loeb

EN SÍNTESIS

Las últimas medidas del fondo cósmico de microondas, la luz más antigua del universo, plantean serias dudas sobre la teoría inflacionaria del cosmos, la idea de que el espacio se expandió exponencialmente tras la gran explosión.

Los modelos tradicionales de inflación predicen variaciones de temperatura en el fondo de microondas distintas de las observadas. También vaticinan la existencia de ondas gravitacionales primordiales, las cuales no se han detectado.

Otro problema de la hipótesis inflacionaria es que sus detalles pueden ajustarse para predecir casi cualquier resultado, lo que impide falsarla. Los cosmólogos deberían considerar nuevas opciones sobre el inicio del universo.

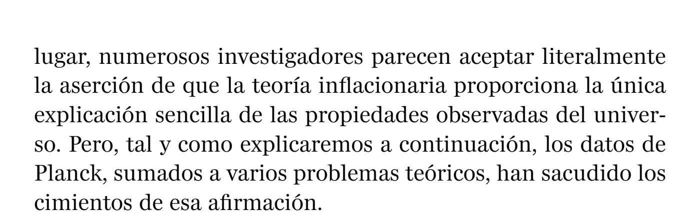


El 21 de marzo de 2013, la Agencia Espacial Europea anunció en una conferencia de prensa los nuevos resultados del satélite Planck. Este había cartografiado el fondo cósmico de microondas (la luz emitida poco después de la gran explosión, hace más de 13.000 millones de años) con un nivel de detalle sin precedentes. El nuevo mapa, explicaron los científicos a los periodistas, confirmaba una teoría que viene ganándose el fervor de los cosmólogos desde hace 35 años. Según ella, nuestro universo comenzó con una gran explosión y, acto seguido, experimentó un breve período de expansión hiperacelerada, o «inflación». Ese estiramiento primigenio del espacio suavizó el cosmos hasta tal punto que, miles de millones de años más tarde, este continúa siendo prácticamente uniforme en todo lugar y a lo largo de cualquier dirección, con una geometría plana (es decir, no curvada, como ocurre en la superficie de una esfera) excepto por minúsculas variaciones en la concentración de materia. Dichas irregularidades dan cuenta de la intrincada jerarquía que definen las estrellas, las galaxias y los cúmulos de galaxias que pueblan el universo.

Anna Ijjas es investigadora posdoctoral en el Centro de Ciencia Teórica de Princeton. Estudia el origen, la evolución y el futuro del universo, así como la naturaleza de la materia y la energía oscuras.

Paul J. Steinhardt ocupa la cátedra Albert Einstein en la Universidad de Princeton y dirige el Centro de Ciencia Teórica. Su investigación abarca problemas de física de partículas, astrofísica, cosmología y física de la materia condensada.

Abraham Loeb preside el departamento de astronomía de Harvard, es fundador de la Iniciativa Agujeros Negros, de la misma institución, y dirige el Instituto de Teoría y Computación del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard.



El mensaje principal de aquella conferencia de prensa fue que los datos de Planck se ajustaban a la perfección a las predicciones de los modelos inflacionarios más simples, reforzando la impresión de que la teoría se hallaba firmemente establecida. El libro de la cosmología parecía concluido.

A raíz del anuncio, los tres autores de este artículo estuvimos analizando sus implicaciones en el Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. Ijjas era entonces una estudiante de doctorado llegada de Alemania para visitar el instituto. Steinhardt, quien hace tres décadas fue uno de los principales arquitectos de la teoría inflacionaria, pero cuyo trabajo posterior ha señalado serios problemas en sus fundamentos teóricos, se hallaba disfrutando de un año sabático en Harvard. Loeb, en su calidad de director del departamento de astronomía, ejercía de anfitrión. Los tres subrayamos la exquisita precisión de las observaciones de Planck, pero no conveníamos en la interpretación. Si acaso, los datos contradecían los modelos inflacionarios más simples y exacerbaban los problemas ya conocidos de los fundamentos de la teoría. Ello no aportaba sino nuevas razones para considerar ideas alternativas sobre el origen y la evolución del universo.

Durante los años siguientes, datos más precisos, obtenidos tanto por el satélite Planck como por otros instrumentos, no han hecho más que proporcionar nuevos indicios en la misma dirección. Aun así, la comunidad de cosmólogos sigue sin replantearse seriamente y con honestidad la teoría inflacionaria, y no presta demasiada atención a las voces que la cuestionan. En su lugar, numerosos investigadores parecen aceptar literalmente la aserción de que la teoría inflacionaria proporciona la única explicación sencilla de las propiedades observadas del universo. Pero, tal y como explicaremos a continuación, los datos de Planck, sumados a varios problemas teóricos, han sacudido los cimientos de esa afirmación.

SEGUIR AL ORÁCULO

Para poner de relieve los problemas de la inflación, comencemos por aceptar el edicto de sus proponentes. Supongamos que la hipótesis fuese cierta más allá de toda duda. Imaginemos que algún oráculo nos convenciese de que la inflación efectivamente tuvo lugar un instante después de la gran explosión. ¿Qué nos diría eso sobre la evolución del universo? Si la inflación fuese capaz de ofrecernos una explicación sencilla del cosmos, cabría esperar que el vaticinio del oráculo nos proporcionase una gran cantidad de información sobre lo que deberíamos ver en los datos de Planck.

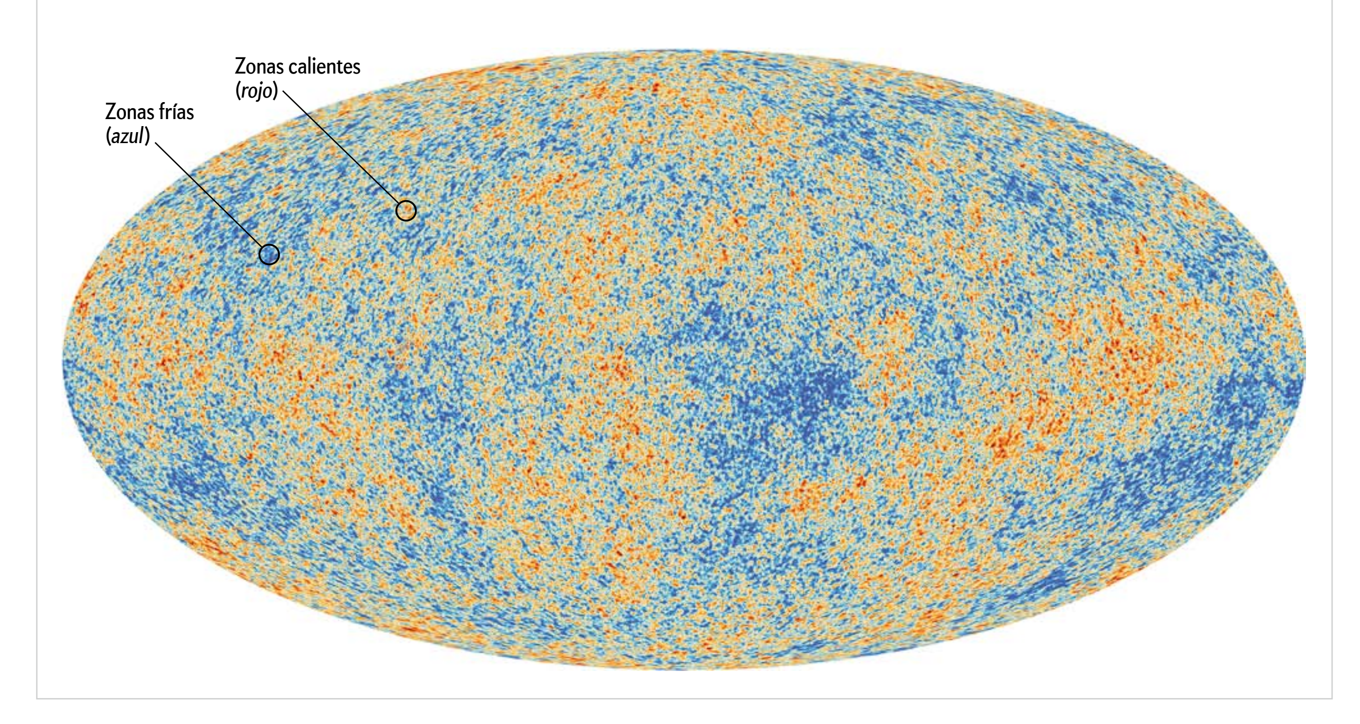
Algo que sí nos diría es que, en una época inmediatamente posterior a la gran explosión, tuvo que existir un pequeño volumen del espacio impregnado por una exótica forma de energía, la cual desencadenó la expansión hiperacelerada en el interior de dicho volumen. Las formas de energía habituales, como las asociadas a la materia y a la radiación, tienden a frenar la expansión cósmica debido a la atracción gravitatoria. Por tanto, la inflación requiere que el universo contenga una gran densidad de energía que ejerza una gravedad repulsiva, a fin de que favorezca la expansión cósmica y la acelere. Llegados aquí, hemos de resaltar que este ingrediente crucial, al que denominamos «energía inflacionaria», es meramente hipotético: hoy por hoy no disponemos de una sola prueba directa de su existencia. Contamos, eso sí, con cientos de propuestas formuladas a lo largo de los últimos 35 años sobre su posible naturaleza. Cada una de ellas genera su propio ritmo de expansión y da lugar a un aumento del volumen total completamente distinto de las demás. Así pues, resulta evidente que la inflación no es una teoría precisa, sino un marco tremendamente flexible que abarca numerosas posibilidades.

Pero ¿qué podría indicarnos la revelación del oráculo que fuera cierto para todos esos modelos? En primer lugar, a partir de nuestros conocimientos básicos de física cuántica, podemos estar seguros de que, al terminar la inflación, la densidad de materia y la temperatura del universo tenían que variar de un

THE VOORHES (*fotografías*)

Fotografía de un universo recién nacido

El mapa del satélite Planck, de la Agencia Espacial Europea, muestra el fondo cósmico de microondas, la luz observable más antigua del universo. Las regiones azules representan puntos donde la temperatura del fondo de microondas —y, por tanto, la del universo primitivo— era menor que la media, mientras que las rojas corresponden a lugares más calientes. La teoría de la inflación cósmica propone que el cosmos se expandió muy rápidamente durante sus primeros instantes. Sus defensores sostienen que la distribución observada de manchas calientes y frías en el fondo de microondas resulta compatible con dicho postulado. Sin embargo, la inflación puede también generar cualquier otro patrón de manchas. De hecho, numerosos modelos predicen variaciones de temperatura más acusadas que las observadas. Además, si la inflación hubiera tenido lugar, el fondo de microondas debería mostrar indicios de la existencia de ondas gravitacionales primordiales («arrugas» en el espaciotiempo causadas por el estiramiento primigenio del espacio), las cuales no se han detectado. Los datos de Planck muestran que la verdadera historia del universo está aún por escribir.



CORTESÍA DE ESA Y COLABORACIÓN PLANCK

punto a otro. Las fluctuaciones cuánticas en la concentración de energía inflacionaria a escalas subatómicas se habrían expandido durante la inflación hasta alcanzar dimensiones cósmicas, dando lugar a regiones con distinta densidad de energía inflacionaria. Según la teoría, la expansión acelerada termina cuando la energía inflacionaria se desintegra y se transforma en materia y radiación comunes. Allí donde su densidad fuese ligeramente superior a la media, la expansión acelerada habría durado un poco más, y tanto la densidad como la temperatura del universo habrían sido algo mayores una vez que esa energía se hubiese desintegrado. De esta manera, las pequeñas fluctuaciones en la densidad de energía inflacionaria inducidas por las leyes cuánticas habrían acabado por generar un patrón de regiones calientes y frías en el fondo cósmico de microondas, el cual conserva un registro de lo que ocurrió en aquella época. A lo largo de los 13.700 millones de años posteriores, esas minúsculas variaciones en la densidad y temperatura del cosmos habrían dado lugar, por efecto de la atracción gravitatoria, a una determinada distribución de galaxias y estructuras a gran escala.

Todo esto supone un buen comienzo, si bien un tanto vago. ¿Podemos predecir el número y la disposición de las galaxias en el espacio? ¿El grado en que el propio espacio se curva y se deforma? ¿La cantidad de materia, o de otras formas de energía, que conforman el universo actual? La respuesta es negativa. La inflación constituye una idea tan maleable que da cabida a cualquier resultado. ¿Acaso explica por qué tuvo lugar la gran explosión o cómo surgió la región espacial inicial que, con el tiempo, acabó por convertirse en el universo que observamos hoy? Una vez más, la respuesta es negativa.

Aunque nos constase que la inflación es cierta, tampoco podríamos predecir gran cosa sobre las manchas calientes y frías observadas por Planck en el fondo de microondas. Tanto el mapa de Planck como todos los estudios anteriores indican que la pauta que sigue la distribución de zonas calientes y frías es prácticamente la misma con independencia de cuán amplia sea la región que consideremos, una propiedad conocida como «invariancia de escala». Los datos más recientes de Planck muestran que las desviaciones con respecto a la invariancia de escala son minúsculas, de apenas un pequeño porcentaje, y que la variación media de la temperatura entre unas manchas y otras es del orden del 0,01 por ciento.

A menudo, los defensores de la inflación insisten en que su teoría es capaz de predecir un patrón de temperatura con esas propiedades. Sin embargo, semejante afirmación deja en el tin-

tero un aspecto clave: la inflación también resulta compatible con muchas otras distribuciones de manchas calientes y frías que no son en absoluto invariantes de escala y que, típicamente, presentan variaciones de temperatura muy superiores al valor observado. En otras palabras: la invariancia de escala es posible, pero también lo sería una gran discrepancia con respecto a ella o cualquier otra situación intermedia, según los detalles que decidamos asignar a la energía inflacionaria. Por tanto, los datos de Planck no pueden considerarse una confirmación de la inflación.

En particular, si supiésemos que la inflación efectivamente ocurrió, hay algo que sí podríamos estar bastante seguros de encontrar en los datos de Planck, puesto que es común a todas las formas simples de la energía inflacionaria, incluidas aquellas que aparecen en los libros de texto. Del mismo modo que las fluctuaciones cuánticas generan variaciones aleatorias en la densidad de energía inflacionaria, inducen también deformaciones igualmente aleatorias en el espacio, las cuales se propagan en forma de ondas a través del universo una vez que la inflación termina. Tales perturbaciones, conocidas como ondas gravitacionales, constituyen otra fuente de variaciones en el fondo de microondas, solo que en este caso generan un efecto particular en la polarización de la luz (en concreto, causan que el campo eléctrico asociado a la luz vibre en una dirección determinada dependiendo de si los fotones se originaron en una zona caliente, una fría o una intermedia).

Por desgracia, la búsqueda de ondas gravitacionales generadas durante la inflación no ha rendido frutos. Aunque las manchas calientes y frías fueron observadas por primera vez en 1992 por el satélite COBE, de la NASA, y más tarde por otros experimentos, por ahora no hay ningún indicio de las ondas gravitacionales predichas por la inflación, a pesar de las minuciosas búsquedas al respecto. (En marzo de 2014, los responsables del experimento BICEP2, en el Polo Sur, anunciaron su detección, pero poco después hubieron de retractarse cuando descubrieron que, en realidad, lo que habían medido era la polarización causada por el polvo interestelar de la Vía Láctea.) Es importante subrayar que las ondas gravitacionales primigenias de las que estamos hablando aquí no guardan ninguna relación con las generadas durante la fusión de agujeros negros en el cosmos actual, las cuales fueron detectadas hace poco más de un año por el Observatorio de Ondas Gravitacionales por Interferometría Láser (LIGO).

Los resultados de Planck (una desviación inesperadamente pequeña con respecto a la invariancia de escala en la distribución de manchas calientes y frías, unida a la ausencia de signos de ondas gravitacionales primigenias) son impresionantes. Por primera vez en más de 30 años, los modelos inflacionarios más sencillos no concuerdan con las observaciones. Por supuesto, los teóricos se han apresurado a parchear la descripción inflacionaria, pero a costa de introducir modelos rocambolescos que han revelado la existencia de aún más problemas.

Los modelos inflacionarios más sencillos no concuerdan con las observaciones. Por supuesto, los teóricos se han apresurado a parchear la descripción inflacionaria, pero a costa de introducir modelos cada vez más rocambolescos

EL ESQUIADOR EN LA PENDIENTE

Para apreciar el impacto de las medidas de Planck, resulta conveniente examinar con un poco más de detalle los modelos que proponen los defensores de la inflación, con todas sus imperfecciones.

Se cree que la energía inflacionaria se debe a un campo hipotético, el inflatón. En el principio, dicho campo habría impregnado todo el espacio, tomando una determinada intensidad en cada punto. Puesto que el inflatón es hipotético, los teóricos gozan de absoluta libertad para asignarle una interacción gravitatoria repulsiva que acelere la expansión del universo. La intensidad del inflatón en un punto del espacio determina la densidad local de energía inflacionaria. La relación entre una y otra puede representarse mediante una curva con aspecto de colina. Cada uno de los cientos de modelos propuestos para describir la energía inflacionaria postula una forma precisa para esta curva. Esta determina las propiedades del universo tras el período inflacionario: por ejemplo, si es plano, suave y si las variaciones de densidad y temperatura son aproximadamente invariantes de escala.

Tras la publicación de los datos de Planck, los cosmólogos se encuentran en una situación muy parecida a la siguiente. Imagine que vive en un pueblo aislado en mitad de un valle rodeado de montañas. Las únicas personas que ha visto en su vida son los habitantes del pueblo, hasta que un día aparece una forastera. Todo el mundo quiere saber cómo ha llegado allí. Según las habladurías (nuestro oráculo local), tuvo que llegar esquiando. Partiendo de esta premisa, usted repara en que solo existen dos montañas que lleguen hasta el valle. Cualquiera que haya leído una guía turística conoce la primera, fácilmente accesible a través de un remonte. Todas las pistas de esquí a ese lado gozan de una pendiente estable, y tanto la visibilidad como las condiciones de la nieve suelen ser buenas.

La segunda montaña es muy distinta. No resulta extraño que no aparezca en ninguna guía: su cima es bien conocida por los aludes, y el único camino que baja hasta el pueblo comienza con una cresta muy plana que, de repente, desemboca en un precipicio escarpado. Además, no hay remonte. La única forma concebible de iniciar el descenso sería saltar desde un helicóptero y, usando un paracaídas, aterrizar con una precisión de centímetros en un punto concreto de la cresta e impactar con la velocidad justa para comenzar. El más mínimo error sacaría de la pista a cualquier esquiador o lo dejaría atrapado en la cumbre. En el peor de los casos, podría desencadenarse un alud antes de que el esquiador alcanzase la cresta, lo que supondría su muerte. Si los rumores están en lo cierto, lo único razonable

sería concluir que la forastera descendió por la primera montaña. La probabilidad de llegar al pueblo por la segunda es infinitesimal en comparación.

Pero entonces reparamos en un pequeño detalle. La forastera no lleva enganchado a la chaqueta el billete del remonte. Basándonos en esta observación, así como en la continua insistencia de los chismorreos que aseguran que la forastera llegó esquiando, nos veríamos arrastrados a aceptar la extravagante conclusión de que tuvo que haber bajado por la segunda montaña. O tal vez no llegó esquiando, y basta con no dar crédito a las habladurías que circulan por el pueblo.

De forma análoga, si algún oráculo nos asegurase que el universo evolucionó hasta su estado actual a partir de un período inflacionario, esperaríamos que la curva que describe la densidad de energía asociada al inflatón fuese como la de la montaña que aparece en las guías turísticas: con una forma simple desde la base hasta la cima, con el menor número posible de parámetros ajustables y con las condiciones menos restrictivas para que la inflación pudiese comenzar. Hasta ahora, de hecho, la inmensa mayoría de los libros de texto presentaban curvas de energía sencillas y uniformes.

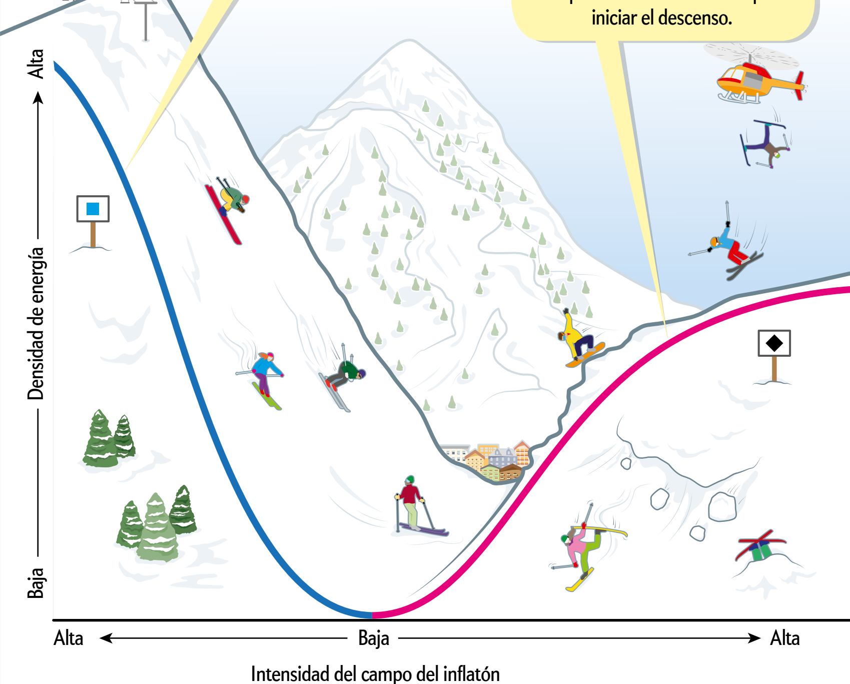
La densidad de energía a lo largo de estas curvas simples se incrementa de manera constante a medida que varía la intensidad del campo, de modo que es posible partir de un valor inicial para el inflatón tal que su densidad de energía coincida con la densidad de Planck. Se cree que esta cantidad (unos 120 órdenes de magnitud superior a la densidad actual de energía en el universo) correspondía a la densidad de energía disponible cuando el universo emergió de la gran explosión. Con esta condición inicial privilegiada, en la que la única forma de energía sería la inflacionaria, la expansión acelerada comenzaría de inmediato. En el proceso, la evolución natural del inflatón (que podemos imaginar como si el campo «esquiase» a lo largo de la curva) haría que su densidad de energía fuese descendiendo lenta y suavemente hasta llegar al valle donde se alcanza el mínimo, una situación que corresponde al universo actual. Esta es la historia clásica del inflatón tal y como aparece en los libros.

Sin embargo, las observaciones de Planck indican que esa historia no se sostiene. Las curvas inflacionarias simples dan lugar a zonas frías y calientes con mayores desviaciones con respecto a la invariancia de escala, así como a ondas gravitacionales lo bastante intensas como para haberlas detectado ya. Si insistimos en la inflación, los datos de Planck indican que el inflatón tuvo que «esquiar» a lo largo de una curva con una forma similar a la de la segunda montaña, con una cresta baja y plana seguida de un precipicio que acababa en el valle, así como con un alto riesgo de aludes. En lugar de una función simple, semejante curva subiría con rapidez (en el precipicio) alejándose del mínimo, para aplanarse después de manera repentina en forma de meseta (la cresta) y alcanzar una densidad de energía un billón de veces menor que la densidad de Planck. En tal caso, la energía inflacionaria apenas supondría una fracción infinitesimal de toda la

DOS VERSIONES DE UNA TEORÍA

La inflación como pista de esquí

Si la inflación realmente ocurrió, tuvo que haber sido producida por una hipotética forma de energía, la energía inflacionaria. A su vez, esta se habría debido a un campo, el inflatón, distribuido por todo el espacio. Distintas versiones de la teoría proponen diferentes relaciones entre la intensidad del inflatón y la densidad de energía inflacionaria. Esta figura representa dos de ellas. Una (*azul*) corresponde a los modelos tradicionales que aparecen en los libros de texto; la otra (*roja*) requiere unas condiciones iniciales muy particulares, por lo que se antoja muy improbable. De ellas, la primera ha sido descartada por los datos más recientes. La analogía con sendas pistas de esquí ilustra por qué la segunda categoría de modelos resulta difícil de creer.



BROWN BIRD DESIGN



energía disponible tras la gran explosión; un valor demasiado bajo para desencadenar la inflación en ese momento.

Dado que el universo no se está inflando, el campo del inflatón puede empezar con cualquier valor y evolucionar a velocidades vertiginosas, al igual que el esquiador que salta del helicóptero. Sin embargo, la inflación solo puede comenzar si el inflatón alcanza un valor correspondiente a un punto de la meseta y si dicho valor varía muy despacio. Del mismo modo que para el esquiador depositado desde las alturas supone una hazaña aterrizar en la cresta plana con la velocidad correcta para iniciar el descenso con suavidad, es prácticamente imposible que el inflatón reduzca su velocidad al ritmo adecuado y en el punto justo para que empiece la inflación. Para empeorar las cosas, dado que el universo no se está inflando en ese momento cercano a la gran explosión en el que el inflatón reduce su velocidad, toda deformación o inhomogeneidad inicial en la distribución de energía se amplificará. Y, al alcanzar cierta magnitud, impedirá que la inflación comience, del mismo modo que un alud imposibilitaría que el esquiador descendiese con suavidad por la pendiente, sin importar cuán perfecta haya sido su trayectoria desde el helicóptero hasta la cresta.

Al aceptar la palabra del oráculo y aferrarnos a la teoría inflacionaria, los datos de Planck nos fuerzan a aceptar la disparatada conclusión de que la inflación comenzó con una curva de densidad de energía con forma de meseta, a pesar de todos los problemas que eso conlleva. O, llegados a este punto, tal vez deberíamos cuestionarnos la credibilidad del oráculo.

EL «MULTIEMBROLLO»

Por supuesto, no hay ningún oráculo. Y no deberíamos aceptar sin más la suposición de que el cosmos comenzó con un período inflacionario, más aún cuando dicha hipótesis no puede proporcionar una explicación sencilla del universo que observamos. Los cosmólogos deberían evaluar la teoría siguiendo el procedimiento científico habitual, consistente en estimar la probabilidad de que la inflación haya tenido lugar a la luz de los datos disponibles. En este sentido, que estos descarten los modelos inflacionarios más simples y favorezcan otros más elaborados supone una noticia rematadamente mala. Aunque, a decir verdad, las últimas observaciones no son el primer problema al que se enfrenta la teoría; en realidad, no hacen sino agudizar cuestiones bien establecidas y darles una nueva vuelta de tuerca.

Por ejemplo, deberíamos considerar si es razonable o no que el universo haya alcanzado las condiciones iniciales necesarias para cualquier tipo de energía inflacionaria, sea esta la que fuere. Para que la inflación comience, han de satisfacerse dos condiciones, a cuál más improbable. En primer lugar, poco después de la gran explosión tuvo que existir una región donde las fluctuaciones cuánticas del espaciotiempo se hubieran amortiguado lo suficiente para que el universo pudiera describirse mediante las ecuaciones clásicas de la relatividad general. Pero, además, esa región tuvo que ser lo bastante plana y presentar una distribución de energía lo suficientemente suave como para que la energía inflacionaria pudiese crecer hasta dominar a todas las demás formas de energía. Varias estimaciones teóricas indican que la probabilidad de hallar una zona con tales características en los instantes inmediatamente posteriores a la gran explosión es menor que la de encontrar una montaña nevada, con remonte y con pistas de esquí en perfecto estado en mitad del desierto.

Pero, además, si fuera fácil encontrar un volumen recién surgido de la gran explosión lo suficientemente plano y suave como para poner en marcha la inflación, entonces esta ya no sería necesaria. Recordemos que el motivo principal para postular la inflación era, de hecho, explicar por qué el universo ha adquirido esas mismas propiedades. Si determinamos que estas constituyen un requisito para desencadenar la inflación, con la única diferencia de que tan solo ha de cumplirse en una región pequeña del espacio, apenas habremos progresado.

Con todo, estas cuestiones no son más que la punta del iceberg. La inflación no solo requiere unas condiciones iniciales muy difíciles de obtener, sino que resulta casi imposible de detener una vez que ha comenzado. Ello se debe a que las fluctuaciones cuánticas del espaciotiempo, responsables de que la intensidad del inflatón varíe de un lugar a otro, provocan que la inflación termine en algunos puntos del espacio antes que en otros. Solemos pensar en las fluctuaciones cuánticas como en algo minúsculo, pero, ya en 1893, varios teóricos (Steinhardt entre ellos) se percataron de que, aun siendo excepcionales, los grandes saltos cuánticos del inflatón podrían cambiar por completo la historia inflacionaria. Dichas fluctuaciones pueden elevar la intensidad del inflatón hasta valores muy por encima de la media, lo que implica que el proceso se prolonga durante mucho más tiempo. Aunque dichos saltos resulten muy improbables, las regiones afectadas se expandirían enormemente en comparación con las demás, por lo que pasarían con rapidez a dominar el espacio. En un instante, toda zona donde la inflación hubiera terminado se vería rodeada de vastas extensiones en las que el espacio se sigue inflando. Entonces el proceso se repite. En la mayor parte de la región en aumento, la intensidad del inflatón variará de tal forma que la densidad de energía disminuya y la inflación termine. Sin embargo, cualquier fluctuación cuántica inusualmente elevada provocaría que el proceso continuase en algunos lugares, lo que crearía más y más volumen inflacionario, en un proceso que se repetiría hasta el infinito.

Así pues, la inflación continuaría eternamente y generaría una infinidad de regiones donde habría acabado, cada una de las cuales daría lugar a su propio universo. Solo allí donde la inflación ha concluido, la expansión del espacio procede con lentitud suficiente para permitir la formación de galaxias, estrellas, planetas y seres vivos. La inquietante implicación de todo esto es que, debido al carácter inherentemente aleatorio de las fluctuaciones cuánticas, las propiedades cósmicas de cada región serían distintas. En general, la mayoría de los universos no exhibirían una geometría plana y libre de grandes deformaciones, la distribución de materia no sería tan suave y el patrón de manchas en el fondo de microondas distaría mucho de la invariancia de escala. Esas regiones abarcarían una cantidad infinita de posibilidades, ninguna de las cuales —tampoco una parecida a nuestro universo— sería más probable que otra. Este resultado es lo que los cosmólogos han dado en llamar el multiverso. Pero, dado que cada región puede exhibir cualquier conjunto de propiedades físicamente concebibles, el multiverso no explica por qué nuestro universo es como es. Todo se debe a rasgos meramente accidentales de nuestra región particular.

Y puede que incluso esta imagen peque de optimismo. Algunos expertos cuestionan que haya zonas del espacio que puedan evolucionar hasta convertirse en un universo similar al nuestro. En vez de eso, la inflación eterna podría degenerar en un mundo puramente cuántico, dominado en todas partes por fluctuaciones aleatorias. Nos gustaría proponer el término «multiembrollo» como uno más apropiado a la hora de describir el desenlace, aún irresoluto, de la inflación eterna, tanto si este consiste en una infinitud de regiones con propiedades aleatorias como si se trata de una maraña cuántica. Desde nuestro punto de vista, no importa cuál de estas descripciones sea la correcta. En ambos casos, el multiembrollo no predice que las propiedades del universo observable constituyan el resultado más probable. Se supone que una buena teoría científica debería explicar por qué ocurre lo que vemos y no otra cosa. El multiembrollo no cumple este criterio básico.

Dado que cada región puede exhibir cualquier conjunto de propiedades, el multiverso no explica por qué nuestro universo es como es. Todo se debe a rasgos meramente accidentales de nuestra región particular

CAMBIO DE PARADIGMA

A la vista de todos estos problemas, la posibilidad de que la inflación no haya ocurrido jamás merece ser considerada en serio. Volviendo un paso atrás, parecen existir dos posibilidades lógicas. O bien el universo tuvo un principio, al que comúnmente nos referimos como «gran explosión»; o bien no lo tuvo y dicha explosión fue más bien un «gran rebote»: una transición entre una fase cósmica precedente y la etapa de expansión actual. Aunque la mayoría de los cosmólogos dan por sentado que hubo una gran explosión, hoy por hoy no existe ninguna prueba —cero— para concluir si lo que ocurrió hace 13.700 millones de años fue una explosión o un rebote. Pero, a diferencia de una explosión, un rebote no necesita un período inflacionario para dar lugar a un universo como el que vemos, por lo que representa un cambio radical de paradigma.

Un rebote puede alcanzar el mismo destino que una explosión seguida de una época inflacionaria porque, durante los miles de millones de años anteriores al rebote, una fase de contracción lenta puede suavizar y aplanar el universo. Quizá resulte antiintuitivo que una contracción lenta ejerza el mismo efecto que una expansión rápida, pero un argumento sencillo nos indica por qué ha de ser así. Recordemos que, en ausencia de inflación, un universo que se expande lentamente se torna cada vez más curvo, deforme y heterogéneo debido a los efectos de la gravedad sobre el espacio y el tiempo. Imaginemos ahora una película marcha atrás de dicho proceso: un universo inmenso, muy curvado, deforme y heterogéneo, el cual se contrae poco a poco hasta volverse plano y uniforme. En un universo que se contrae con lentitud, la gravedad opera a la inversa como un agente suavizante.

Al igual que en el caso de la inflación, las leyes cuánticas también alteran la historia del suavizado en las teorías con rebote. Las fluctuaciones cuánticas modifican la tasa de contracción en cada punto, de modo que algunas zonas rebotan (con lo que vuelven a expandirse y a enfriarse) antes que otras. Es posible construir modelos en los que la tasa de contracción da lugar a variaciones de la temperatura que, tras el rebote, resultan compatibles con la distribución de manchas frías y calientes observada por Planck. Esto es, la contracción anterior al rebote puede llevar a cabo la misma tarea que los proponentes de la inflación encomendaron a esta.

Al mismo tiempo, las teorías con rebote gozan de una importante ventaja: no generan ningún multiembrollo. Cuando comienza la fase de contracción, el universo es grande y clásico (es decir, queda bien descrito por la relatividad general de Einstein) y rebota antes de alcanzar el tamaño en el que los efectos cuánticos se tornan importantes. Como resultado, nunca se llega a un estado en el que el universo entero queda dominado por las leyes cuánticas, por lo que no tenemos necesidad de inventar una transición entre la física cuántica y la clásica. Y como ninguna inflación hincha de manera desproporcionada

El buen estado de la cosmología inflacionaria

El paradigma inflacionario goza de mejor salud que nunca. Las críticas vertidas contra él resultan falaces y sus alternativas, poco creíbles

JUAN GARCÍA-BELLIDO

Cuando *Investigación y Ciencia* me pidió que comentase las críticas de Anna Ijjas, Paul Steinhardt y Abraham Loeb a la situación actual de la teoría inflacionaria, publicadas originalmente en *Scientific American*, dudé un buen rato. Su artículo resultaba tan tendencioso que me pareció obvio que el lector bien informado reconocería de inmediato sus falacias sin necesidad de que nadie las hiciese explícitas. Sin embargo, tras hablar con Andrei Linde, de Stanford, y más tarde con Alan Guth, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (dos de los fundadores de la teoría inflacionaria), comprendí que tal vez dichos sesgos no fuesen obvios para todos los lectores. De manera que decidí aceptar la invitación.

Lo primero que llama la atención del artículo es el empleo de un lenguaje peyorativo («seguir al oráculo», «chismorreos», «multiembrollo») poco común en los textos científicos. El uso de esas palabras tiene un propósito: predisponer al lector en contra de un paradigma fuertemente afianzado en la comunidad científica, de enorme éxito epistemológico y cuyas predicciones han sido contrastadas con exquisita precisión por los experimentos. Un paradigma que, además, nutre la investigación de un creciente número de científicos de reconocido prestigio. ¿Están todos ellos equivocados?

La pista de esquí

El argumento principal empleado por los autores pivota sobre la supuesta improbabilidad de los potenciales del inflatón (la «forma de la pista de esquí», en el ejemplo usado en el artículo) que resultan favorecidos por los datos del satélite Planck. No obstante, dicho argumento adolece de un defecto básico: hoy por hoy, no disponemos de una manera rigurosa que nos permita comparar entre sí los distintos potenciales. Como consecuencia, cualquier razonamiento basado en la supuesta improbabilidad asociada a cualquier potencial concreto resulta falaz.

No es cierto que los modelos típicos de inflación predigan variaciones de temperatura distintas de las observadas: existen varios modelos bien conocidos que se ajustan perfectamente a las observaciones. Y si bien los primeros modelos inflacionarios postulaban potenciales polinómicos simples, hoy en día tenemos una forma de pensar más moderna, basada en teorías de campos efectivas, donde los potenciales del inflatón que se ven favorecidos por los datos de Planck sí resultan naturales. En esos modelos, la huella de las ondas gravitacionales primordiales en el fondo cósmico es aún demasiado pequeña para poder detectarla con los medios actuales, por lo que ello no puede usarse como argumento contra el paradigma inflacionario.

Por otro lado, los comentarios sobre las hipotéticas trayectorias del esquiador hasta el valle presuponen un conocimiento preciso de la montaña por encima de ciertas cotas, lo que resulta análogo a conocer la teoría de partículas a altas energías. Sin embargo, más allá de cierta escala ignoramos cuál es la física responsable de las interacciones fundamentales. En la analogía empleada por los autores, esto correspondería a una niebla que nos impide ver las posibles trayectorias del esquiador. Por tanto, toda argumentación sobre la naturalidad de unas frente a otras es pura especulación.

Es más, todos los argumentos relacionados con la hipotética trayectoria del inflatón hasta llegar al mínimo quedan hueros si, en el proceso, el universo pasó por un «falso vacío» (el equivalente a un pequeño valle situado algo más arriba en la colina) del cual salió por efecto túnel. Es decir, si parte del camino procedió mediante efectos cuánticos, y no según una trayectoria clásica, cuyas características supuestamente inaceptables centran todas las críticas de los autores. De hecho, la existencia de un falso vacío intermedio se ve fuertemente favorecida por los últimos avances en teoría de cuerdas, las cuales predicen un número exorbitante de mínimos (vacíos) posibles.

El multiverso y sus alternativas

El multiverso, que tanto rechazo levanta entre los autores, constituye una consecuencia lógica de las mismas premisas que permiten explicar las pequeñas irregularidades del fondo de microondas y la dis-

las regiones donde se producen fluctuaciones cuánticas de gran magnitud, el suavizado ejercido por una contracción no genera múltiples universos. Varios trabajos recientes han presentado las primeras propuestas detalladas para describir el paso de la contracción a la expansión, permitiendo así la construcción de cosmologías de rebote completas.

¿CIENCIA NO EMPÍRICA?

Dadas las cuestiones que plantea la inflación y las posibilidades de las cosmologías con rebote, lo normal sería que existiese un acalorado debate entre cosmólogos sobre cómo distinguir entre ambas teorías a la luz de las observaciones. Sin embargo, hay algo que lo impide: la cosmología inflacionaria, tal y como la entendemos hoy, no puede ser evaluada mediante el método científico. Como hemos explicado, el desenlace de la inflación cambia con facilidad si se varían las condiciones iniciales, si se modifica la forma de la curva de densidad de energía inflacionaria, o si nos limitamos a tener en cuenta la inflación eterna y el consiguiente multiembrollo. Tanto de manera individual como colectiva, tales características hacen de la inflación una teoría tan flexible que ningún experimento puede desmentirla.

Algunos científicos aceptan que la inflación no puede ponerse a prueba, pero se niegan a abandonarla. En su lugar, proponen que es la ciencia la que debe cambiar y deshacerse de una de sus propiedades definitorias: la verificabilidad empírica. Esta idea ha desatado una auténtica montaña rusa de discusiones sobre la naturaleza de la ciencia y sobre su posible redefinición en pos de algún tipo de ciencia no empírica [*véase* «Los límites del método científico», por Adán Sus; Investigación y Ciencia, abril de 2016].

Es un error bastante común afirmar que los experimentos sirven para falsar una teoría. En la práctica, una teoría falli-

tribución a gran escala de galaxias en el universo. Sabemos que las variaciones de temperatura en el fondo cósmico son de unas pocas partes por cien mil. Esa cifra corresponde, por tanto, a la magnitud de las fluctuaciones cuánticas que tuvieron lugar poco después de la gran explosión. Sin embargo, dichas fluctuaciones están asociadas a la escala del horizonte cósmico actual; es decir, al tamaño del universo observable hoy. Si consideramos escalas más y más vastas, podemos ver que llega un momento en el que las fluctuaciones cuánticas asociadas se tornan del orden del cien por cien. En ese instante —mucho más cercano en el tiempo a la gran explosión— el espaciotiempo se torna completamente inhomogéneo y comienzan a crearse otros «universos burbuja». En otras palabras: el multiverso no es más que la realización natural a gran escala de las anisotropías del fondo de microondas. Ambos fenómenos aparecen como consecuencia del mismo formalismo: la teoría cuántica de campos en el espaciotiempo curvo que implica la inflación.

De manera similar a como ocurría a la hora de comparar los posibles potenciales para el inflatón, aquí no disponemos de una teoría de la medida que nos permita asignar probabilidades bien definidas a los distintos universos. Sin embargo, el hecho de que hasta ahora no hayamos logrado dar sentido a la probabilidad de encontrar ciertos universos en lugar de otros no nos impide plantearnos seriamente la posibilidad de que existan más allá de nuestra burbuja observable. En cualquier caso, lo que no puede hacerse es criticar el multiverso por «no predecir que las propiedades del universo observable constituyan el resultado más probable»: a falta de una teoría de la medida, tales probabilidades simplemente resultan imposibles de evaluar, al menos por el momento.

Por otra parte, la «cura» que proponen los autores (una cosmología con rebote) adolece exactamente de los mismos problemas que ellos achacan a la inflación. En lugar de generar una región homogénea y de gran tamaño a partir de un volumen microscópico inicial, el «rebote» del universo necesita postular de entrada dicha homogeneidad, con un ajuste fino que resulta exponencialmente más restrictivo que el de las condiciones iniciales requeridas para la inflación.

¿Un «universo inteligente»?

Para acabar, los argumentos de cariz teleológico, o de «diseño inteligente», empleados por los autores (su insistencia en que una teoría cosmológica debería predecir un universo tal y como el que vemos, y no otras cosas) recuerdan a los ataques lanzados hace 150 años contra la teoría de Darwin, la cual proporcionaba un mecanismo genérico para explicar la evolución biológica. Es muy cierto que la selección natural no predice la existencia de las especies y los seres vivos que hoy pueblan la Tierra, sino la evolución de unas especies en otras, pero ¿deberíamos rechazarla por ello?

Es más, la teoría de Darwin no hacía ninguna predicción concreta que pudiera contrastarse mediante las observaciones ni los experimentos. Ese no es el caso de la teoría inflacionaria, la cual sí predice varias de las propiedades clave del universo que observamos: la planitud de su geometría a gran escala; su homogeneidad; la existencia de fluctuaciones adiabáticas, gaussianas e invariantes de escala en el fondo cósmico de microondas; las propiedades de las llamadas «oscilaciones acústicas bariónicas», y la existencia de correlaciones «acausales» entre la temperatura y la polarización de los fotones del fondo del microondas (es decir, correlaciones a escalas mayores que la del horizonte cósmico en el momento en el que se emitieron dichos fotones). Todas estas predicciones se han visto confirmadas con extraordinaria precisión por los datos de Planck. La única que falta por verificar es la impronta de las ondas gravitacionales primordiales en el fondo cósmico, lo que a su vez nos permitiría asignar una escala de energía a la inflación. Es de esperar que el enorme desarrollo experimental en el estudio del fondo de microondas nos permita confirmar este fenómeno en un futuro próximo.

La inflación proporciona un mecanismo genérico coherente para explicar con un detalle asombroso numerosas cualidades no triviales del universo. También nos permite entender su dinámica y evolución a escalas que se encuentran fuera del alcance de los aceleradores de partículas presentes o futuros. Los datos de Planck, gracias a su exquisita precisión, han situado este gran paradigma científico en una posición mucho mejor que nunca.

Juan García-Bellido *es investigador en el Instituto de Física Teórica, un centro mixto de la Universidad Autónoma de Madrid y el CSIC. Ha destacado por sus aportaciones al campo de la cosmología inflacionaria.*

PARA SABER MÁS

Inflationary paradigm after Planck 2013. Alan Guth, David Kaiser y Yasunori Nomura en *Physics Letters B*, vol. 733, págs. 112-119, junio de 2014.

da se torna cada vez más inmune al experimento a medida que la vamos enmendando. Se vuelve cada vez más esotérica y rocambolesca para ajustar las nuevas observaciones, hasta que su poder predictivo disminuye hasta tal punto que ya ni siquiera se persigue. La capacidad predictiva de una teoría se mide por el conjunto de posibilidades que excluye. Una mayor inmunidad equivale a menor exclusión y, por tanto, a una capacidad menor. Una teoría como el multiembrollo no descarta absolutamente nada, por lo que su poder predictivo es nulo. Declarar que una teoría vacía constituye la visión canónica e incuestionable requiere algún tipo de garantía más allá de la ciencia. A falta de oráculo, la única alternativa es el principio de autoridad. La historia nos enseña que este no es el camino correcto.

Hoy tenemos la suerte de contar con preguntas concretas y fundamentales impuestas por las observaciones. Que nuestras ideas más destacadas no sean capaces de darles respuesta nos brinda una oportunidad histórica para una revolución teórica. En lugar de cerrar el libro del cosmos primitivo, deberíamos reconocer que este sigue abierto de par en par.

PARA SABER MÁS

Inflationary paradigm in trouble after Planck 2013. Anna Ijjas, Paul Steinhardt y Abraham Loeb en *Physics Letters B*, vol. 723, n.º 4-5, págs. 261-266, junio de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Universos paralelos. Max Tegmark en *IyC*, julio de 2003.
La inflación a debate. Paul J. Steinhardt en *IyC*, junio de 2011.
¿Existe el multiverso? George Ellis en *IyC*, octubre de 2011.



BIOMECÁNICA

EL SECRETO DE LA VELOCIDAD HUMANA

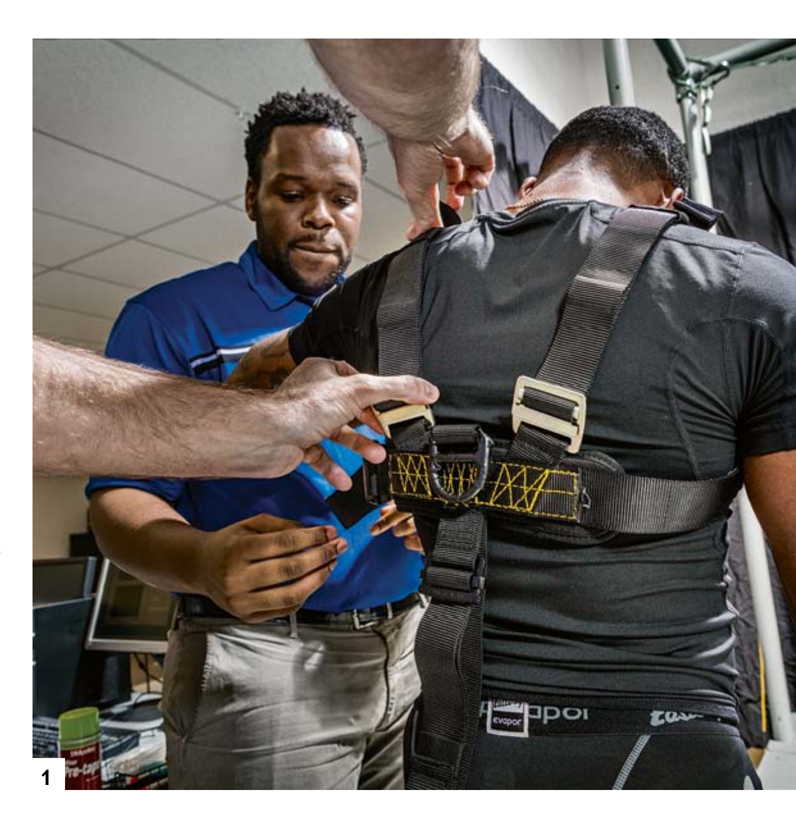
Una nueva perspectiva de la biomecánica del esprint podría proporcionar una ventaja competitiva a los atletas

Dina Fine Maron





Dina Fine Maron es editora asociada de *Scientific American*.



1

Un viernes por la mañana de principios del año pasado, el velocista Mike Rodgers se ataba a un arnés de seguridad suspendido del techo sobre una cinta de andar fabricada a medida. «Nunca se ha caído nadie, pero tú podrías ser el primero», le previnieron. Rodgers sonrió y se preparó para empezar a correr. Por entonces se dedicaba a entrenar para las pruebas olímpicas, pero aquel día no iba a practicar ninguno de sus habituales y agotadores ejercicios en la pista o en la sala de pesas de su gimnasio. En vez de eso, se había presentado en un pequeño edificio blanco de Dallas en cuya puerta se leía, con letras en relieve, «Laboratorio de Rendimiento Locomotor».

Desde el exterior, el centro no ofrece mucho interés: una imprenta reconvertida enfrente de una guardería canina y un centro de yoga. Sin embargo, en los últimos años, docenas de velocistas como Rodgers han visitado estas instalaciones de la Universidad Metodista del Sur, bien para buscar el consejo del científico deportivo Peter G. Weyand acerca de su técnica de carrera, o bien para participar en sus estudios. Weyand ha llevado a cabo lo que muchos investigadores consideran unos de los mejores trabajos hasta la fecha sobre la biomecánica del esprint y sobre cómo los atletas de élite consiguen alcanzar velocidades de récord. Sus hallazgos se incorporaron incluso al entrenamiento de los principales velocistas estadounidenses que participaron en los pasados Juegos Olímpicos de Río de Janeiro.

El núcleo de la operación lo constituye la cinta de andar de Weyand, un artilugio de unos 250.000 dólares equipado con plataformas especializadas que miden la fuerza que el corredor ejerce sobre el suelo durante la locomoción. Tres cámaras situadas alrededor de la máquina capturan a alta velocidad imágenes tridimensionales de la zancada del usuario. Rodgers albergaba la esperanza de que todos esos datos revelaran detalles que le permitieran efectuar los ajustes necesarios para rebajar su marca en una crucial fracción de segundo en los cien metros lisos.

Vestido con el mismo tipo de zapatillas, pantalón corto y camiseta de licra, y con pegatinas reflectantes que Weyand solicita que se pongan todos los sujetos, Rodgers comienza a correr, trotando a poco más de 10 kilómetros por hora para calentar. Pronto, sin embargo, casi supera los 37 kilómetros por hora. A ese ritmo, el tatuaje de su pantorrilla derecha (un dibujo del Correcaminos con la frase «Atrápame» inscrita debajo) se convierte en un borrón a simple vista. El equipo transmite las medidas que toma a un programa informático que representa gráficamente sus movimientos.

Weyand ha estudiado a más de 120 corredores, entre los cuales figuran otros 12 velocistas de talla mundial. Sus observaciones le han ayudado a rellenar una antigua laguna en el conocimiento de la biomecánica de las carreras de velocidad. Antes de sus investigaciones, imperaba la creencia de que los grandes velocistas son especialmente diestros en acomodar con rapidez las extremidades para dar el siguiente paso mientras los pies siguen en el aire. Pero esta afirmación nacía en buena parte más de la intuición que de una teoría basada en datos. Weyand fue el primero que puso a prueba esta idea y sus hallazgos han demostrado que era equivocada. La clave de la velocidad parece residir en un factor totalmente distinto, y Weyand asegura que puede enseñar a los corredores a mejorarlo.

PREPARADOS

Aunque la práctica de correr como deporte se remonta al menos al año 776 a.C., cuando el único evento de los primeros Juegos Olímpicos consistía en una carrera a pie, la ciencia que lo sustenta ha ido muy a la zaga. Los primeros intentos para obtener datos rigurosos sobre corredores quizá se deban al premio nóbel británico Archibald Hill, quien en 1927 llevó a cabo un experimento en el cual los velocistas, que portaban imanes, esprintaban delante de grandes bobinas de cable que detectaban dichos imanes. Al conocer la distancia entre las

EN SÍNTESIS

Tradicionalmente se creía que, para convertirse en un velocista de élite, el atleta debe reacomodar las extremidades en el aire para dar el siguiente paso más rápido que los demás corredores.

Los últimos hallazgos indican que, en realidad, la fuerza con la que los corredores golpean el suelo desempeña una función crucial en su rendimiento.

Los análisis biomecánicos han puesto de manifiesto los factores que contribuyen a tal fuerza y el modo en que los atletas pueden mejorarlos para conseguir mayores velocidades.

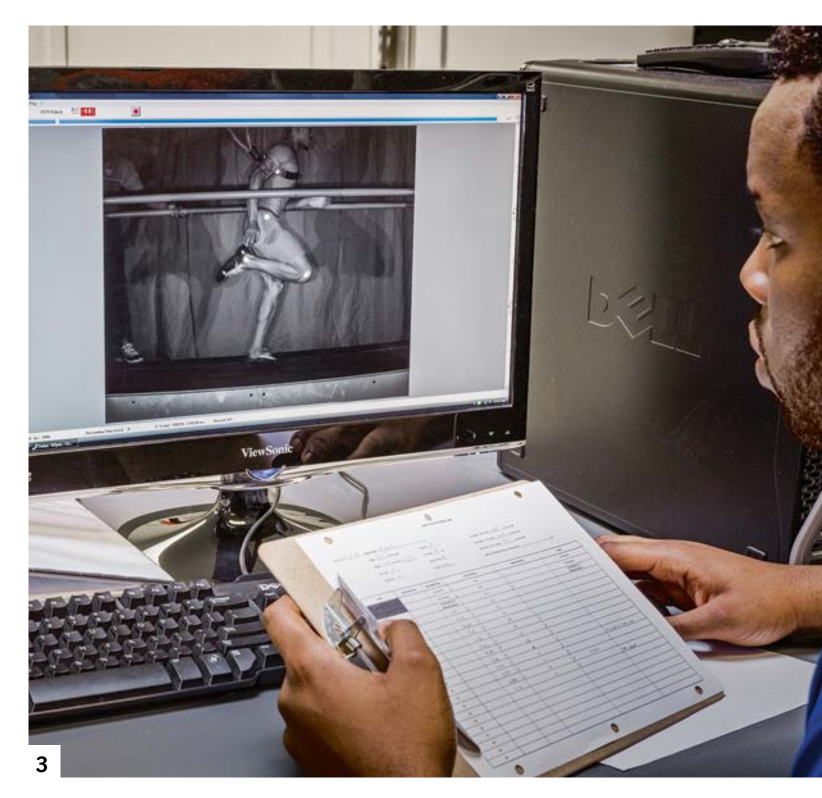
JEFF WILSON (*fotografías*)



DATOS EN MOVIMIENTO: Investigadores de la Universidad Metodista del Sur preparan al velocista estadounidense Mike Rodgers para correr en su laboratorio (*1*). Para ayudar a seguir sus movimientos, Andrew Udofa, estudiante de doctorado, coloca pegatinas reflectantes en la pierna de Rodgers (*2*). Los datos se transfieren automáticamente a un programa informático que ayudará al equipo de la universidad a analizar la zancada del corredor (*3*).



2



3

bobinas, podía calcular la velocidad y la aceleración de los corredores.

La invención de las modernas plataformas de fuerza en los años cincuenta proporcionó los medios para estudiar otro aspecto de la mecánica de las carreras. Estos aparatos, que se asemejan a básculas, registran la magnitud del peso aplicado sobre ellos y lo miden a lo largo de una zancada. Con tales herramientas es posible analizar la fuerza variable ejercida por un corredor a diferentes velocidades durante una prueba atlética, o bien comparar las fuerzas de distintos tipos de pisada, como las de los corredores que apoyan primero el talón frente a las de aquellos que caen sobre la punta del pie. En los años setenta, Giovanni Cavagna, de la Universidad de Milán, recopiló datos de fuerza de atletas a los que hacía correr sobre plataformas colocadas en una pista. Sin embargo, debido al elevado precio de las placas, disponía de un número limitado de ellas, suficientes tan solo para abarcar una pequeña fracción de la distancia total. Para recoger datos de todo el circuito, Cavagna tuvo que repetir el experimento múltiples veces y desplazar las placas después de cada carrera. Tras combinar las pocas zancadas que registró en cada ocasión obtuvo una imagen completa del circuito.

Basándose en estos y en otros estudios previos, la ciencia de las carreras de velocidad se enfocó principalmente en los factores que frenan a los corredores, como la resistencia del aire, indica el experto en locomoción animal Jim Usherwood, de la Universidad de Londres, en lugar de aquello que los acelera. En conjunto, el trabajo arrojó escasa luz sobre lo que los velocistas podían hacer para aumentar su rendimiento.

La investigación de Weyand ha contribuido a desplazar ese foco y a generar conocimientos que los atletas pueden aplicar. Pero él no es el primero en prever tales avances. Dado que la velocidad viene determinada por el producto de la longitud de la zancada por su frecuencia, los deportistas suponían que una reducción del tiempo que cada pie está en contacto con el suelo produciría un incremento de velocidad. En el año 2000, Weyand y sus colaboradores publicaron un artículo revelador que demostraba lo que en realidad ocurre. Seleccionaron a 33 atletas de características diversas y los hicieron correr en una versión preliminar de su cinta equipada con plataformas de fuerza. Los resultados fueron sorprendentes. Weyand esperaba que los pies de los corredores más rápidos pasaran menos tiempo en contacto con el suelo y, por tanto, más tiempo en el aire, que los pies de sus homólogos más lentos. Sin embargo, no previó que, con independencia de las características de los corredores, el tiempo transcurrido desde el momento en que despegaban un pie del suelo hasta el momento en que volvían a posarlo era el mismo en todos ellos.

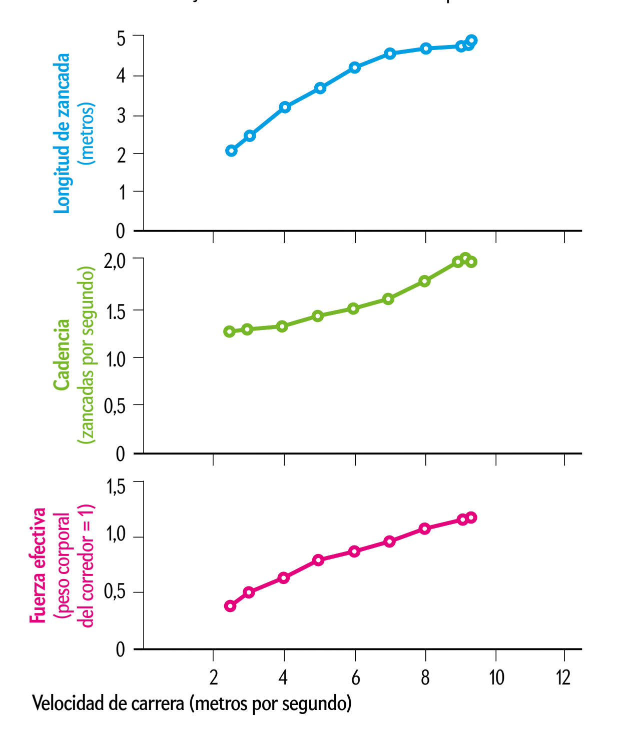
Lo que realmente distingue a los grandes velocistas de los demás, descubrieron, radicaba en la fuerza con la que golpean el suelo. En trabajos posteriores, Weyand determinó que, a la velocidad máxima, los mejores corredores pisaban con fuerzas máximas de hasta cinco veces su peso corporal; por el contrario, entre corredores medios, la proporción era de 3,5 veces. La diferencia tiene importancia porque, al igual que una superpelota que cuanto más fuerte se lance más alto rebota, un corredor que golpea el suelo con una mayor fuerza almacena más energía en el impacto y, como resultado, avanzará más lejos y más rápido, y realizará zancadas más largas. Una pisada enérgica también permite a los atletas rebotar más deprisa, lo que reduce el tiempo que los pies pasan en contacto con el suelo y, por tanto, aumenta la cadencia. Los mejores corredores tienen zancadas más largas y más frecuentes.

LISTOS

Recientemente, el equipo de Weyand ha desentrañado, además, por qué los mejores velocistas logran generar esas elevadas fuerzas, y con ello ha obligado a que se revisara otro principio fundamental del mundo de las carreras. Según el popular modelo

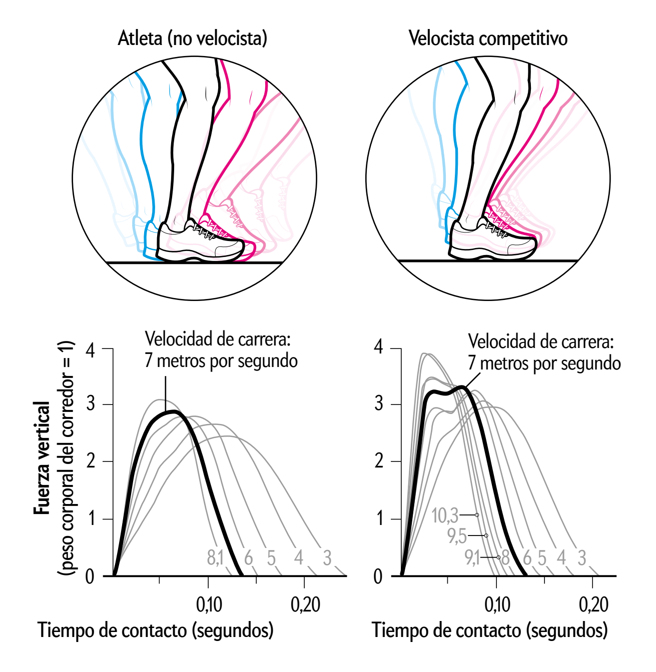
Cómo ganar terreno

¿Qué hace falta para ser un velocista de élite? La genética y el entrenamiento influyen, pero no son los únicos elementos que contribuyen a la velocidad. En los últimos años, diversos estudios llevados a cabo usando técnicas de última generación han proporcionado una nueva visión de la biomecánica del esprint que puede ayudar a que tanto velocistas profesionales como aficionados rebajen drásticamente sus tiempos de carrera.



La fuerza, un factor clave

Se sabe desde hace tiempo que un incremento en la longitud de la zancada y la cadencia de paso aumentan la velocidad de carrera (*gráfica superior e intermedia*). En el 2000, Peter G. Weyand y su equipo de la Universidad Metodista del Sur demostraron que los corredores más rápidos también golpean el suelo con una fuerza mayor (*gráfica inferior*). Resulta que la fuerza es lo que determina la longitud de zancada y la cadencia.



La forma afecta a la fuerza

Las piernas de los corredores medios se mueven pasivamente como zancos saltadores que golpean el suelo y rebotan hacia el aire. Cuando se representa en una gráfica la fuerza frente al tiempo en contacto con el suelo, se obtiene una curva suave (*izquierda*). En 2014, el equipo de Weyand mostró que las piernas de los velocistas de élite, por el contrario, funcionan como pistones para proporcionar golpes más fuertes que dan lugar a contactos más rápidos con el suelo. En consecuencia, cuando se representan sus movimientos se obtiene una curva más abrupta (*derecha*). Para golpear el suelo con tanta fuerza, los velocistas deben mantener rígidos los tobillos; si los aflojan el rebote se debilita, pues los tobillos absorben parte de la fuerza en el impacto.

FUENTES: «ARE RUNNING SPEEDS MAXIMIZED WITH SIMPLE-SPRING STANCE MECHANICS?» POR KENNETH P. CLARK Y PETER G. WEYAND, EN *JOURNAL OF APPLIED PHYSIOLOGY*, VOL. 117, N.° 6; 15 DE SEPTIEMBRE DE 2014 (*abajo a la derecha*); «FASTER TOP RUNNING SPEEDS ARE ACHIEVED WITH GREATER GROUND FORCES NOT MORE RAPID LEG MOVEMENTS», POR PETER G. WEYAND ET AL., EN *JOURNAL OF APPLIED PHYSIOLOGY*, VOL. 89, N.° 5; 1 DE NOVIEMBRE DE 2000 (*izquierda*); JEN CHRISTIANSEN (*gráficas*); BROWN BIRD DESIGN (*ilustración*)

de masa-resorte postulado a finales de los años ochenta para describir la mecánica de la carrera, las piernas de los corredores se mueven de modo relativamente pasivo: funcionan como zancos saltadores con muelles para atrapar el cuerpo al golpear el suelo y luego impulsarlo de nuevo hacia el aire al rebotar. Las representaciones gráficas de la fuerza de las pisadas se asemejan a una curva suave y simétrica.

Pero el modelo se basa en observaciones de corredores que avanzan a velocidades inferiores. Cuando Weyand, Laurence Ryan, físico de la Universidad Metodista del Sur, y Ken Clark, experto en biomecánica, ahora en la Universidad de West Chester, analizaron sus grabaciones de vídeo y los datos de fuerza, advirtieron que el modelo no parecía sostenerse con los velocistas más rápidos. En lugar de contraerse y expandirse con fluidez, como los muelles de un zanco saltador, sus piernas actuaban más como pistones, proporcionando golpes intensos y bruscos. Los datos de fuerza de las pisadas producían un pico alto y estrecho.

Un meticuloso estudio de las extremidades inferiores de estos rápidos corredores reveló factores sutiles que contribuyen a las elevadas fuerzas que generan: ponen rígido el tobillo justo antes de golpear el suelo, lo que sirve para decelerar el pie y el tobillo una fracción de segundo después del impacto. Esta desaceleración ayuda a maximizar la fuerza ejercida por el cuerpo sobre el suelo en respuesta al impacto y a evitar que se pierda. Los velocistas de élite, además, mantienen altas las rodillas y las sitúan a la máxima distancia del suelo, lo cual les proporciona tiempo y espacio para acelerar sus pisadas y, finalmente, plantar el pie con mayor fuerza. Estos hallazgos, publicados en 2014, tenían una lógica, asegura Weyand: si uno golpea a alguien con la muñeca floja, el impacto no será muy fuerte, pero si la mantiene rígida, propina sin duda un mejor puñetazo.

Estas percepciones cimientan ahora las recomendaciones que el equipo de Weyand da a corredores y entrenadores que buscan su consejo acerca de cómo aumentar el rendimiento. «Se trata de simples indicaciones. No les decimos que desaceleren; les aconsejamos que se pongan rígidos al tocar el suelo y que la desaceleración se producirá a causa de ello», explica Weyand. Un corredor que siga este consejo notará un golpe más fuerte



LA CLAVE DE LA VELOCIDAD: Weyand, experto en biomecánica, ha dedicado dos décadas en averiguar los elementos que convierten un corredor medio en un velocista de élite.

con el suelo en cada pisada, añade. El comportamiento del resto del cuerpo no carece de importancia: tobillos, rodillas, caderas, torso y cabeza deberían permanecer rígidos también.

Los hallazgos de Weyand no han sorprendido a todos. El biomecánico Ralph Mann, antiguo vallista olímpico que ahora trabaja con corredores y entrenadores en la Federación de Atletismo de Estados Unidos, ya proporcionaba ese tipo de información a los corredores, comenta el preparador Darry Woodson, que entrena a ocho velocistas, entre ellos Rodgers. Woodson declara que poseer datos concretos que respalden el consejo de Mann, sin embargo, hace que los entrenadores muestren más seguridad en lo que les explican a los corredores.

¡YA!

Los atletas de élite que se han tomado en serio la tutela de Weyand manifiestan su mejoría. El vallista olímpico David Oliver, tras haberse llevado a casa la medalla de bronce en 2008, quería aumentar su rendimiento, de modo que su entrenador de fortalecimiento lo llevó a visitar a Weyand en 2012. Este último localizó dos puntos débiles de Oliver: apoyaba los pies demasiado lejos de su centro de gravedad y dejaba las rodillas muy atrás —en vez de en paralelo o por delante de la rodilla alterna—, lo cual limitaba la fuerza de la pisada. Oliver declara que se centró en estos problemas en su entrenamiento y en los ejercicios de fortalecimiento y, tras varios meses, observó un constante progreso. Continuó hasta ganar la medalla de oro en la prueba de 110 metros vallas del campeonato del mundo celebrado en Moscú el año siguiente, y aún ocupa la cuarta posición en la clasificación histórica del evento.

Pero al margen de informes anecdóticos, hasta la fecha no se ha publicado ningún estudio científico sobre los corredores que han intentado seguir los consejos de Weyand. Sin embargo, una investigación en curso sugiere que sus recomendaciones pueden reportar beneficios importantes. Matt Bundle, de la Universidad de Montana, ha estado analizando cómo afectan estas indicaciones a velocistas voluntarios y ha descubierto mejoras equiparables a las que creemos que se obtienen al consumir drogas potenciadoras del rendimiento, comenta. «Se trata de un aumento espectacular.»

Aun así, Weyand reconoce que la biomecánica no lo determina todo. Quedan todavía muchas áreas por estudiar y aspectos que escapan al control del corredor, admite. La genética claramente cumple una función muy importante, por ejemplo. «Si uno no posee una constitución aceptable y unas propiedades musculares que le permitan ser enérgico, no conseguirá ser un gran velocista», explica. Y a veces un atleta logra compensar las deficiencias biomecánicas: la persona más rápida jamás cronometrada, el jamaicano Usain Bolt, no ejecuta de forma impecable todos los aspectos mecánicos, según Weyand. Su forma de correr sugiere que otros factores lo ayudan, especialmente su altura y su fuerza.

Los científicos deportivos observan que los descubrimientos de Weyand pueden aplicarse no solo a los atletas de élite, sino también a los velocistas que corren por ocio. Mantener rígido el tobillo, elevar las rodillas y tratar de golpear el suelo con fuerza no convertirá en atletas olímpicos a la mayoría de la gente, pero puede ayudarla a batir su marca personal, aseguran. Por supuesto, golpear el suelo con tanta fuerza podría resultar perjudicial para un corredor aficionado. Si una persona se encuentra en baja forma, esos golpes podrían provocar lesiones, como dolor de rodillas, dolor plantar, estrés tibial o una enfermedad conocida como metatarsalgia, en la que la planta del pie se inflama. J. B. Morin, de la Universidad Sophia Antipolis de Niza, recomienda correr cuesta abajo como parte de un régimen de entrenamiento diseñado para mantener rectos los tobillos. También sugiere saltar a la comba para potenciar una reacción rápida. (Los hallazgos de Weyand se aplican exclusivamente a los velocistas. Los corredores de resistencia no pueden golpear el suelo con tanta fuerza, pues necesitan conservar su energía durante más tiempo.)

Por su parte, Rodgers ha recibido buenas noticias de Weyand. En general, los mejores velocistas «atacan el suelo», según el científico deportivo. Los datos de fuerza de Rodgers demuestran que ya hace exactamente eso. Aunque solo pesa 75 kilos, golpea la cinta de andar con más de 315 kilos de fuerza, y eso aun cuando tenía los músculos cansados por el ejercicio anterior. Su valoración presagia una buena carrera en las grandes competiciones deportivas.

PARA SABER MÁS

Faster top running speeds are achieved with greater ground forces not more rapid leg movements. Peter G. Weyand et al. en *Journal of Applied Physiology*, vol. 89, n.º 5, págs. 1991–1999, noviembre de 2000.

Foot speed, foot-strike and footwear: Linking gait mechanics and running ground reaction forces. Kenneth P. Clark, Laurence J. Ryan y Peter G. Weyand en *Journal of Experimental Biology*, vol. 217, n.º 12, págs. 2037–2040, junio de 2014.

Are running speeds maximized with simple-spring stance mechanics? Kenneth P. Clark y Peter G. Weyand en *Journal of Applied Physiology*, vol. 117, n.º 6, págs. 604–615, septiembre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

La preparación del atleta olímpico. Jay T. Kearney en *IyC*, julio de 1996.

Atletas medallistas, ¿nacidos para triunfar? Rachel Nuwer en *MyC* n.º 82, 2017.



DESPEGUE: Los investigadores lanzan un dron modificado para tomar muestras de microorganismos atmosféricos en un campo de cultivo situado en las proximidades de Blacksburg, en Virginia.

BIOLOGÍA

Microbios patógenos de altos vuelos

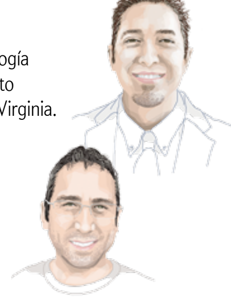
Con la ayuda de drones y la teoría del caos se está analizando el modo en que los microorganismos se propagan por el aire y dañan los cultivos de todo el planeta

David Schmale y Shane Ross

Fotografías de Adam Ewing



David Schmale es catedrático del departamento de fitopatología, fisiología vegetal y malherbología en el Instituto Politécnico y Universidad estatal de Virginia.



Shane Ross es profesor de sistemas dinámicos y dinámica de fluidos en el departamento de ingeniería biomédica y mecánica del mismo centro.

El aire que nos rodea rebosa de vida microscópica. Cada vez que inspiramos, inhalamos miles de bacterias, virus y hongos. Desde hace 150 años se sabe que los microbios transportados en el aire causan enfermedades en plantas, animales domésticos y personas. Más recientemente, se ha descubierto que influyen también en la meteorología al favorecer la congelación del agua a temperaturas más elevadas y generar precipitaciones. Asombrosamente, algunos de estos microbios surcan océanos y continentes arrastrados por grandes corrientes de aire. Las nuevas herramientas y los avances técnicos permiten conocer mejor la procedencia de los microorganismos, sus mecanismos de dispersión y las sorprendentes formas en que afectan a nuestro planeta a lo largo de sus periplos.


1

Los autores de este artículo llevamos más de una década persiguiendo patógenos especialmente nocivos para los cultivos agrícolas. Al ser responsables de una amplia variedad de daños, como plagas y envenenamientos por toxinas, causan pérdidas anuales de miles de millones de dólares en todo el planeta. Uno de nosotros (Schmale) estudia la aerobiología de microorganismos fitopatógenos; el otro (Ross) desarrolla modelos matemáticos para describir y predecir el movimiento de las corrientes de aire en distancias largas y cortas. Nuestra colaboración nació en 2006 con el objetivo de identificar las rutas seguidas por los fitopatógenos para dispersarse entre campos, regiones o continentes.

Con esa meta (exclusiva de nuestra colaboración), desplegamos una pequeña flota de aeronaves no tripuladas (drones) equipadas con instrumentos de muestreo para recoger y analizar los microbios presentes en la región inferior de la atmósfera. En cada campaña de muestreo obtenemos una amplia variedad de microorganismos de interés, muchos de ellos apenas estudiados o desconocidos para la ciencia. Hemos desarrollado nuevos métodos para entender el transporte a larga distancia de los microbios atmosféricos. Y hemos formulado nuevas hipótesis acerca de cuánto pueden llegar a ser arrastrados por el viento y cómo pueden facilitar la generación de lluvia, nieve y otras formas de precipitación.

En última instancia, nuestro trabajo podría ayudar a los gestores agrónomos a controlar los microorganismos patógenos existentes en el aire, predecir hacia dónde se dirigen y, por tanto, identificar las parcelas agrícolas que deben tratarse o ponerse en cuarentena. La información permitirá a los agricultores decidir, entre otras cosas, qué variedades de cultivo plantar o cuándo utilizar fungicidas u otros compuestos para proteger sus campos. Hemos centrado buena parte de nuestra investigación en un patógeno en particular: *Fusarium graminearum*, un hongo que en las últimas décadas se ha dispersado más y con mayor rapidez que nunca debido, en parte, al cambio climático y a las prácticas agrícolas sin labranza. Ello ha causado un aumento

EN SÍNTESIS

La fusariosis de la espiga constituye una de las afecciones más extendidas y devastadoras para las cosechas. La patología afecta principalmente a la cebada, la avena y otros cereales de pequeño tamaño, y se ha propagado por nuevas regiones del planeta a medida que el clima cambia.

Dado que el hongo causante de la fusariosis viaja a través del aire, los autores desplegaron una serie de drones y desarrollaron complejas simulaciones para tratar de calcular las distancias que pueden llegar a recorrer los patógenos. Los últimos hallazgos demuestran que los microorganismos se desplazan decenas o centenares de kilómetros transportados por distintos sistemas meteorológicos y siguiendo intrincadas rutas atmosféricas en continuo movimiento.

En un futuro, este trabajo podría ayudar a los agricultores a proteger sus cosechas al permitir un seguimiento de la dispersión de los fitopatógenos y la aplicación de medidas más efectivas.

ADAM EWING (*fotografías*)



de los residuos de cultivos en los campos, lo que ha favorecido la persistencia de la infección de un año a otro. Cuando los expertos en agricultura, entre los que nos incluimos, manifestamos preocupación acerca de la amenaza inminente que supone el calentamiento global para el suministro mundial de alimentos, estamos pensando en una propagación explosiva de hongos que haría que los cereales no fueran aptos para el consumo.



PLAN DE VUELO: Los drones empleados para analizar los microbios de la región inferior de la atmósfera están equipados con placas de Petri especialmente adaptadas para que se abran y cierren según se ordene desde tierra (*1*). Un dron vuela siguiendo una ruta previamente programada (*2*). Una espora recogida en el aire se desarrolla en el laboratorio y da lugar a un cultivo puro de *Fusarium* (*3*).

TOXINAS EN NUESTRA COMIDA

Muchos ignoran lo devastadores que resultan los microbios patógenos para la agricultura. Una de las peores afecciones vegetales es la fusariosis de la espiga, que decolora las espigas del trigo, la cebada, la avena y otros cereales de pequeño tamaño y llena las semillas de unas sustancias denominadas micotoxinas. Estas, ingeridas en grandes cantidades, causan enfermedades y frecuentes vómitos en personas y ganado. Dado que generalmente no puede separarse el grano afectado del sano, las cosechas deben analizarse y destruirse en caso de que su contenido en toxinas supere un valor umbral.

Distintas especies del género *Fusarium* causan fusariosis en todo el mundo. Durante mucho tiempo, *Fusarium asiaticum* ha acarreado problemas en China, desde donde ha comenzado a propagarse hacia el norte. En EE.UU. predomina *F. graminearum*, que hizo estragos en el maíz en la década de los setenta y provocó enfermedades en un gran número de cabezas de cerdo (el brote conllevó el descubrimiento de la micotoxina desoxinivalenol, que causa vómitos y rechazo a la comida en el ganado porcino). Dado el alto coste que supone controlar la fusariosis, la rentabilidad de plantar y cosechar trigo ha disminuido gradualmente en muchos estados de EE.UU. donde suele cultivarse.

F. graminearum sobrevive el invierno escondido en los restos vegetales que quedan en el suelo tras la cosecha. En primavera y verano se desarrollan en estos restos unas estructuras fúngicas llamadas peritecios que liberan con fuerza esporas de *Fusarium* a la atmósfera. Las esporas, a su vez, caen sobre las anteras de trigo y las sedas de maíz recién aparecidas. Después germinan y el hongo se propaga a través de la planta, con la consiguiente acumulación de micotoxinas en el cereal. La contaminación de un cultivo al siguiente supone la razón por la que los agentes de extensión agrícola recomiendan a los agricultores evitar sembrar trigo inmediatamente después de haber cultivado maíz u otras plantas propensas a la fusariosis.

MUROS DE AIRE

Uno de los objetivos de nuestra colaboración consiste en comprender el mecanismo por el que los microorganismos son transportados a través de la atmósfera. Nuestro primer paso consistió en calcular la distancia que puede recorrer *F. graminearum* en el aire desde un campo afectado en el transcurso de un día o una noche.

Financiado por la Iniciativa contra la Fusariosis del Trigo y la Cebada de EE.UU. y el Comité de Cereales Pequeños de Virginia, llevamos a cabo una serie de experimentos en trigales comerciales de Virginia. Utilizamos una cepa particular de *F. graminearum* que habíamos aislado de otras partes del estado y analizamos su ADN. De este modo podíamos distinguirla de las cepas ya existentes en los cultivos que pretendíamos estudiar. A continuación diseminamos tallos de maíz infestados con nuestro hongo experimental sobre un área aproximada de media hectárea. Después colocamos en el suelo, a distintas distancias desde el punto de inoculación, una serie de placas de Petri para capturar cualquier posible espora de *Fusarium*.

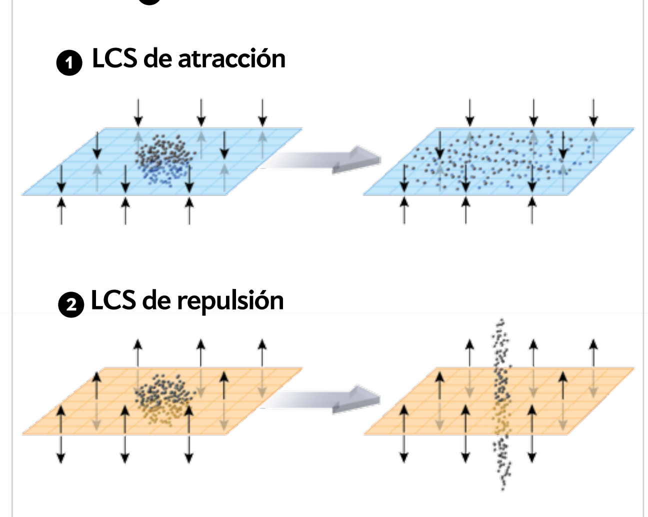
En una de nuestras series de experimentos recuperamos esporas de nuestra cepa casi a un kilómetro de distancia del punto donde la habíamos liberado. No había forma de saber hasta dónde podrían haber llegado, ya que nuestro muestreo estaba limitado a un kilómetro. En todo caso, parece claro que habían recorrido distancias mucho más largas de lo estimado inicialmente por la mayoría de los investigadores.

En lugar de continuar distribuyendo placas de Petri por el terreno a distancias cada vez mayores para localizar nuestras esporas de *Fusarium*, decidimos buscar los microorganismos

NOCIONES BÁSICAS

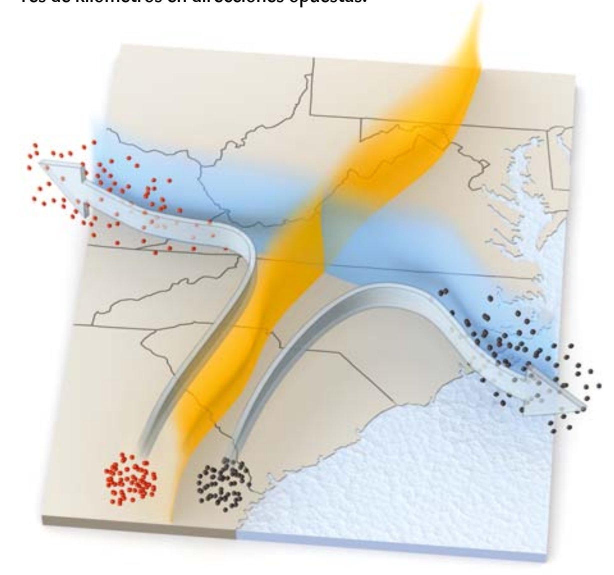
Muros de aire

El movimiento del aire, igual que el de otros fluidos, crea ciertos patrones, como el de la corriente en chorro del Atlántico, cuya forma está condicionada por unos «muros» temporales de aire conocidos como estructuras coherentes lagrangianas (LCS, por sus siglas en inglés). Estas se clasifican principalmente en dos categorías: las que atraen corrientes de aire (y cualquier partícula que contengan) y las que repelen las parcelas de aire cercanas. Las complejas matemáticas que gobiernan dichas estructuras (*representadas abajo en azul y naranja*) determinan que una masa de partículas, como las esporas de hongos, se distribuya por la superficie del muro ❶ o forme una columna a cada lado de él ❷.



Los muros, o LCS, generan distintos patrones de flujo de aire

La intersección de una LCS de atracción (*azul*) y otra de repulsión (*naranja*) crea un flujo de aire especial conocido como punto de silla. En este ejemplo, dos grupos de partículas viajan inicialmente bastante próximos entre sí, pero al alcanzar el punto de silla recorren centenares de kilómetros en direcciones opuestas.



en el aire situado por encima de los cultivos que estudiábamos. Cuanto mayor era la altura a la que los hallábamos, más podíamos recurrir a los complejos cálculos matemáticos utilizados en las observaciones meteorológicas para determinar la distancia teórica que podrían haber recorrido.

Así, modificamos una serie de drones para equiparlos con aparatos especiales de muestreo que recogían y analizaban microorganismos del aire durante el vuelo. Con financiación de los programas de Sistemas Dinámicos y Fronteras Emergentes de la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU., utilizamos esas aeronaves no tripuladas para recoger algunas de las esporas de *F. graminearum* que ya flotaban sobre nuestras cabezas en Virginia. El análisis de los resultados indicó que algunos de los hongos habían estado flotando en el aire desde hacía horas, el tiempo suficiente como para haber sido trasladados cientos de kilómetros por patrones meteorológicos a gran escala.

Los estudios posteriores revelaron que unos invisibles «muros de aire» de naturaleza móvil y efímera desempeñaban una función fundamental en las distancias que recorrían los hongos y los lugares donde estos aterrizaban. Estas configuraciones atmosféricas, formalmente conocidas como estructuras coherentes lagrangianas (LCS, por sus siglas en inglés) se originan cuando distintas corrientes de aire (o en general de cualquier fluido) convergen o sortean un obstáculo, como una montaña o el ala de un aeroplano. La dirección y la velocidad iniciales de la corriente en el momento del contacto definen por dónde continuarán viajando las partículas del aire y los patrones que generarán. Estos pueden ser simulados por ordenador utilizando las complejas matemáticas de la teoría del caos y una rama especializada de la física conocida como dinámica no lineal.

Como cabría esperar, los muros de aire condicionan buena parte de los fenómenos meteorológicos que observamos cotidianamente. Se ha demostrado que las intrincadas LCS, en constante cambio, modelan, concentran y ramifican el aire situado sobre el océano Atlántico y causan, por ejemplo, que los vientos de un huracán se intensifiquen o se disipen conforme la tormenta se mueve por encima del agua. A menor escala, unas estructuras similares determinan la forma en que los patógenos aéreos se elevan, caen en picado o se arremolinan en un valle; en ocasiones se depositan en un campo de cultivo pero no en la propiedad colindante. Tras estudiar la evolución espaciotemporal de las LCS, hemos formulado hipótesis acerca de la posible procedencia de amenazas microbianas para una región en particular y del lugar adonde podrían dirigirse a continuación. A medida que mejoremos nuestra capacidad de predecir tal información, los agricultores podrán hallar nuestros pronósticos microbianos tan útiles como el parte del tiempo.

Pero los hongos *Fusarium* representan solo la punta del iceberg. Evidentemente, al viajar en la atmósfera, los microbios no respetan las fronteras internacionales. Surgida en Uganda a finales del siglo pasado, una cepa letal de la roya del tallo del trigo (Ug99) se ha propagado por todo el continente africano; los cultivadores australianos y norteamericanos están muy preocupados ante su posible llegada a través de las corrientes atmosféricas que suelen desplazarse sobre los océanos Índico y Atlántico, respectivamente. La roya de la soja llegó por primera vez a EE.UU. desde Sudamérica por medio del huracán Iván de 2004; ahora se esconde en el sur de EE.UU. durante el invierno y cada año, durante el período vegetativo, se dispersa hacia el noreste y el oeste medio del país a través de unas predecibles rutas aéreas (el hongo no sobrevive a los duros inviernos). Incluso se ha establecido una red de vigilancia nacional por parte de

EMILY COOPER

una coalición del sector agrícola para controlar la propagación anual del patógeno en cada temporada.

Curiosamente, muchos de esos microbios no lograrían sobrevivir por sí solos en unos trayectos tan largos en la atmósfera. Por un lado, una exposición prolongada a la radiación solar ultravioleta podría aniquilarlos. Pero los que consiguen adherirse a partículas de polvo quedan protegidos de los rayos esterilizantes del sol. Científicos como Dale Griffin, del Servicio de Inspección Geológica de EE.UU., han demostrado la existencia de varias vías bien establecidas de transporte global de polvo que conectan, por ejemplo, África con Europa y Asia, o Asia con EE.UU. De hecho, se estima que cientos de millones de toneladas de polvo sahariano, con microbios incorporados, aterrizan cada año en Florida. Además de causar calimas y atardeceres espectaculares, las nubes de polvo pueden provocar daños ecológicos graves. Estudios recientes indican que algunos de los causantes de patologías coralinas en el Caribe, en particular la aspergilosis en abanicos de mar, podrían haber viajado con polvo africano. El peligro aumenta con la creciente desertificación del noroeste de África, donde las cada vez más extensas tierras áridas marginales aportan polvo que acarrea y protege un mayor número de microbios nocivos para plantas situadas a distancias enormes.

VIENTO Y AGUA

En sus viajes atmosféricos, los microbios no solo propagan enfermedades. También pueden influir en los fenómenos meteorológicos que se producen por encima de la tierra, los lagos y los océanos. Los meteorólogos saben desde hace tiempo que, en general, el granizo, la nieve y la lluvia caen del cielo después de que se hayan formado cristales de hielo en las nubes. La posibilidad de que alrededor de una partícula de hielo se forme un copo de nieve o una gota de lluvia depende de determinadas condiciones ambientales, como la presencia de partículas (como el hollín) que permitan la congelación del agua a temperaturas más elevadas de lo habitual. (El agua pura se congela a temperaturas tan bajas como –38 ºC.)

En 1982, David Sands, de la Universidad estatal de Montana, y sus colaboradores postularon que existían otros factores que podían servir de núcleo para la formación de cristales de hielo en la atmósfera, especialmente la bacteria *Pseudomonas syringae*. Los estudios posteriores sugirieron un posible mecanismo. Algunas cepas de esta bacteria producen en la superficie celular cierta proteína que atrapa las moléculas de agua de tal modo que empiezan a configurar una red cristalina. En el suelo, tales cepas causan daños por heladas en las cosechas. Pero también pueden alcanzar las nubes, donde la temperatura se halla muy por debajo de los cero grados. Sands estimó que si ese tipo de bacterias produjera un volumen suficiente de proteínas nucleadoras de hielo en el cielo, podrían traer consigo la formación de gotas de lluvia y copos de nieve.

Al menos, ese es el planteamiento. Desde la publicación de Sands, se han identificado grandes cantidades de *P. syringae* en muestras representativas de lluvia y nieve. Resulta difícil demostrar si los microbios son los principales responsables de la formación de las precipitaciones o si simplemente las acompañan. No obstante, los gestores de las estaciones de esquí no esperan a obtener una respuesta definitiva: muchos utilizan nucleadores de hielo comerciales que contienen *P. syringae* para producir nieve artificial durante los días más cálidos del invierno.

La hipótesis de Sands nos sirvió de inspiración para comprobar si podríamos hallar otros microorganismos en la atmósfera que generaran precipitaciones. Con el apoyo del programa Dimensiones de la Biodiversidad, de la Fundación Nacional para la Ciencia de EE.UU., la investigación llevada a cabo por Schmale y sus colaboradores ha demostrado que la variedad de microbios asociados a las precipitaciones es mucho mayor de lo estimado inicialmente. En Virginia, Boris Vinatzer y Schmale han recogido en la atmósfera y en las precipitaciones una amplia variedad de bacterias y hongos que actúan como nucleadores de hielo, al menos en el laboratorio. La diversidad de este tipo de microorganismos parece variar según la localización geográfica. Comprender mejor las razones del predominio de cada uno de ellos en distintas regiones permitiría mejorar nuestra predicción de los fenómenos meteorológicos. Y quizás en un futuro podríamos usar algunos de esos microorganismos para desarrollar herramientas que fabriquen lluvia en regiones áridas o azotadas por la sequía.

En última instancia, esperamos combinar lo aprendido sobre los microorganismos presentes en gotas de agua con nuestros cálculos sobre estructuras coherentes lagrangianas para describir lo que ocurre en el aire situado por encima de la superficie de lagos, ríos y océanos. Ya hemos comenzado a tomar muestras microbianas por encima del agua con la ayuda de barcos sin tripulación y drones aéreos. Las ecuaciones matemáticas requeridas para describir la mezcla del aire cargado de microbios con el agua dispersada por las olas, el viento o el impacto de la lluvia son más complejas que cualquier reto al que nos hubiéramos enfrentado anteriormente. Sin embargo, dado que el agua cubre cerca de un 70 por ciento del planeta, no nos cabe duda de que nuestros hallazgos revelarán nuevas y fascinantes maneras en que los microbios recorren el globo terrestre. IyC

PARA SABER MÁS

Mycotoxins in crops: A threat to human and domestic animal health. David G. Schmale III y Gary P. Munkvold en *Plant Health Instructor*. Publicado en línea, 2009. **www.apsnet.org/edcenter/intropp/topics/Mycotoxins/Pages/default.aspx**

Life in the clouds. Lesley Evans Ogden en *BioScience*, vol. 64, n.º 10, págs. 861-867, octubre de 2014.

Highways in the sky: Scales of atmospheric transport of plant pathogens. David G. Schmale III y Shane D. Ross en *Annual Review of Phytopathology*, vol. 53, págs. 591-611, agosto de 2015.

The surprising importance of stratospheric life. Chelsea Wald en *Nautilus*, n.º 37, cap. 1, 2 de junio de 2016. **nautil.us/issue/37/currents/the-surprising-importance-of-stratospheric-life**

EN NUESTRO ARCHIVO

Muros de agua. Dana Mackenzie en *IyC*, marzo de 2014.

por Constantí Stefanescu y Oriol Massana

El vuelo transcontinental de una mariposa

La vanesa de los cardos migra a lo largo de miles de kilómetros siguiendo los cambios estacionales

Las grandes migraciones no son exclusivas de las aves, las tortugas marinas o las ballenas. Aunque suele ignorarse, también las presentan los insectos. Las investigaciones de nuestro grupo sobre este fenómeno se centran en la mariposa conocida como cardera o vanesa de los cardos (*Vanessa cardui*), posiblemente el insecto que realiza el ciclo migratorio más largo, con un circuito cerrado de más de 10.000 kilómetros.

Hasta hace poco teníamos escasa información sobre la cardera. Solo sabíamos que llega a Europa cada año, procedente de África. Gracias al Programa de Seguimiento de las Mariposas en Cataluña, iniciado en 1994 y coordinado por el Museo de Ciencias Naturales de Granollers, logramos precisar que las llegadas se concentran entre abril y mayo y que coinciden con la entrada de vientos saharianos. Más tarde, mediante modelos estadísticos que utilizan información sobre la dirección de los vientos, identificamos diversas zonas del Magreb como origen más probable de las mariposas. Una primera expedición a esa región en marzo de 2009 nos permitió localizar las áreas de emergencia masiva de las carderas, justo antes de efectuar sus vuelos migratorios a España.

En una siguiente fase, con datos de seguimientos europeos hemos reconstruido la migración a escala continental. Las mariposas llegan a la región mediterránea en primavera, se reproducen y mueren. Pero la descendencia, que nace un mes y medio más tarde, prosigue la migración y coloniza el centro y norte de Europa; allí también se reproduce y da lugar a una nueva generación que emerge en verano pero que desaparece poco después. El uso del radar entomológico ha confirmado que dicha generación efectúa en otoño vuelos migratorios hacia el sur, aunque los insectos resultan «invisibles» para los observadores terrestres porque tienen lugar a una altura de centenares de metros para sacar provecho de los vientos favorables. Por consiguiente, se desconocía hasta dónde se desplazaban.

Recientemente, hemos llevado a cabo análisis isotópicos de las alas de las mariposas para entender mejor el funcionamiento de la migración de otoño. En la fase de oruga, las carderas incorporan en sus tejidos la proporción de moléculas de hidrógeno y de su isótopo estable, el deuterio, presente en las plantas nutricias. Esta proporción, que varía con la latitud, queda fijada también en los tejidos de las alas de los adultos, y puede utilizarse para establecer la región en la que estos se desarrollaron como oruga. Mediante esta técnica, hemos confirmado que las carderas que abandonan Europa en otoño viajan hasta el Magreb, pero también hasta el África subsahariana, donde producen nuevas generaciones y completan así un circuito migratorio transcontinental extraordinario.

—Constantí Stefanescu
—Oriol Massana
Museo de Ciencias Naturales de Granollers
Barcelona





EL SUR DE MARRUECOS constituye el principal destino y origen de los cientos de miles de carderas que cada año efectúan las migraciones entre Europa y el norte de África. El hábitat preferido son los palmerales (*izquierda*), pues son muy productivos y contienen los recursos tróficos necesarios tanto para las mariposas adultas (el néctar que ofrecen distintas plantas) como para sus larvas (sobre todo, malvas y cardos). Pero incluso los paisajes desolados (*derecha*) pueden albergar, en otoño, miles de carderas que aprovechan el néctar que ofrecen las acacias.

DESPUÉS DE UN VUELO MIGRATORIO de más de 1000 kilómetros, esta cardera recupera energía libando ávidamente de una flor de alfalfa en el sur de Marruecos, en octubre de 2015.

DETALLE del ala posterior de una cardera. El análisis de isótopos estables de este tejido permite inferir el origen de las migraciones.

FOTOGRAFÍAS DE ORIOL MASSANA

por Joaquim Berenguer Clarià



Joaquim Berenguer Clarià, doctor en historia de la ciencia por la Universidad Autónoma de Barcelona, colabora en el proyecto de investigación «Matemáticas e ingeniería: nuevas perspectivas críticas (siglos XVI-XX)» en la Universidad Politécnica de Cataluña.

La introducción del cálculo diferencial en España

Tomàs Cerdà y la teoría de fluxiones en la España del siglo XVIII

La introducción del cálculo diferencial en la España del siglo XVIII no es un tema novedoso de estudio. Con todo, lejos de haberse completado su análisis, en estos últimos años se están descubriendo nuevos e interesantes matices sobre la forma en que se desarrolló. Uno de sus protagonistas fue el jesuita Tomàs Cerdà.

Nacido en Tarragona en 1715, Cerdà inició su labor profesional como profesor de teología y filosofía. En 1754, fue enviado por la Compañía de Jesús al observatorio astronómico de la Marina de Marsella para que conociera las nuevas corrientes científicas europeas. Durante los tres años que permaneció allí, tuvo acceso a los textos matemáticos más influyentes del momento y entró en contacto con el cálculo diferencial.

De vuelta a España, Cerdà se incorporó a la cátedra pública de matemáticas del Colegio de los jesuitas de Cordelles de Barcelona, creada para él en octubre de 1757. La Universidad de Barcelona había sido trasladada a Cervera por Felipe V en 1714, y el Colegio de Cordelles era de las pocas instituciones donde se podían cursar estudios superiores en la ciudad. En el caso de las matemáticas, la de Cordelles fue la única cátedra pública de esta disciplina a lo largo de más de un siglo.

Durante la estancia en Cordelles, Cerdà publicó dos textos que, como él mismo explica en la introducción del primero, fueron los manuales que utilizó para sus clases. Se trata de *Liciones de mathematica o elementos generales de arithmetica y algebra para el uso de la clase* (1758) y *Lecciones de mathematica o elementos generales de geometria para el uso de la clase* (1760). Pero la intención de Cerdà iba más allá de escribir un ensayo sobre álgebra y otro sobre geometría. En varias ocasiones, manifestó la voluntad de publicar diversos tratados, uno de los cuales es el *Tratado de fluxiones* (o de cálculo diferencial e integral). En un borrador de una carta escrita en 1758 al matemático británico Thomas Simpson (1710-1761), autor de *The doctrine and application of fluxions* (1750), Cerdà reconocía que este libro fue, en efecto, el modelo que siguió para su propio tratado.

En 1765, Cerdà se trasladó a Madrid y se convirtió en el primer profesor de matemáticas del Colegio Imperial, el principal colegio de la Compañía de Jesús en España. Ejerció el cargo hasta la expulsión de los jesuitas del país dos años después. Ya en el exilio, se instaló en la ciudad italiana de Forlí, donde murió en 1791.

PORTADA DEL LIBRO *Liciones de mathematica o elementos generales de arithmetica y algebra para el uso de la clase*, que Tomàs Cerdà escribió en 1758 y que fue publicado en Barcelona como manual para sus alumnos en el Colegio de Cordelles. (Grabado de Joan Pau Canals i Camps y Francesc Boix.)

WWW.ATLESDEBARCELONA.CAT

Los manuscritos sobre el *Tratado de fluxiones*

Los manuscritos relativos al *Tratado de fluxiones* se localizaron a finales del siglo pasado en la Real Academia de Historia de Madrid, dispersos entre dos legajos y mezclados con otras obras de Cerdà o de otros autores. Ha sido preciso reordenarlos para identificar cada uno de los 24 capítulos, en los que el jesuita recogió gran parte del contenido del libro de Simpson, además de añadir texto original.

Los primeros 14 capítulos, que están repetidos y corresponden a dos versiones de un mismo texto, forman una parte diferenciada del resto del tratado. Por la manera de redactarlos y por su presentación, claramente constituyen un manual dirigido a los propios alumnos de Cerdà. Posiblemente corresponden a unos apuntes que el jesuita utilizó en sus clases, a los que añadió correcciones y anotaciones, reescribió para aclarar las explicaciones, enriqueció con figuras (mejorándolas notablemente en la segunda versión), y todo ello con la intención de imprimirlos. Es muy probable que estos primeros capítulos constituyesen el programa de un curso que Cerdà impartió tanto en el Colegio

de Cordelles de Barcelona como en el Imperial de Madrid.

Una confluencia de visiones

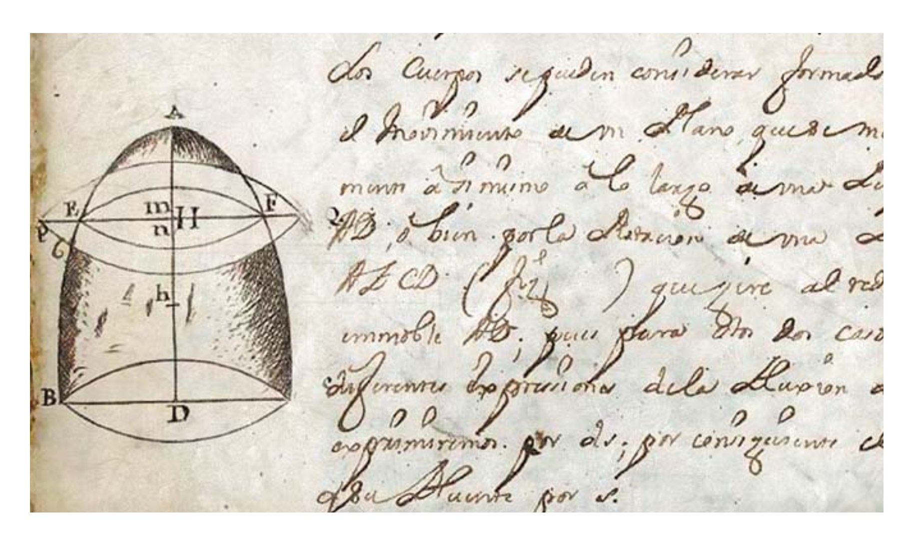
Cuando Cerdà escribió su *Tratado de fluxiones*, el cálculo diferencial e integral se estaba desarrollando a partir de dos concepciones paralelas: la newtoniana, en Inglaterra, y la leibniziana, en la Europa continental. También en España el nuevo cálculo estaba llegando a través de estas dos corrientes. Cerdà fue uno de los primeros en introducir el cálculo diferencial en la enseñanza, adoptando la perspectiva newtoniana del texto de Simpson.

En el cálculo de Newton, toda cantidad o variable matemática, llamada fluente, está generada por un movimiento donde el tiempo cumple una función de variable continua de la que dependen todas las otras cantidades. La fluxión es para Newton la velocidad con la cual la fluente aumenta o disminuye según el movimiento que la produce. Esta concepción cinemática está ausente en el cálculo diferencial leibniziano, donde las cantidades variables son vistas como una secuencia de valores que difieren infinitamente poco entre sí.

Con el propósito de distanciarse de los infinitésimos, que constituían el núcleo vertebrador del cálculo diferencial leibniziano, Simpson matizó la definición de fluxión newtoniana. Esta pasó a considerarse un incremento finito de la variable que se produciría en el caso de que la velocidad (con la que se genera dicha variable en un momento determinado) se mantuviese constante. Cerdà asumió el método de las fluxiones, es decir, la visión geométrico-cinemática newtoniana, y adoptó la definición de fluxión de Simpson. De este modo, al menos en el plano teórico, tomaba distancias respecto al cálculo diferencial leibniziano, basado en el concepto de «diferencia» como una cantidad infinitamente pequeña.

No obstante, en un panorama en el que los fluxionistas querían alejarse del uso inicial de los infinitésimos por parte de Newton y rechazaban todo aquello que tenía que ver con las cantidades infinitésimas, cabe destacar la actitud de Simpson y Cerdà, ya que, sin dejar la visión newtoniana, tanto uno como otro se acercaron al cálculo diferencial continental.

Un síntoma de ese acercamiento es que, pese a asumir plenamente la definición de fluxión de Simpson, Cerdà prefirió la notación leibniziana (dx) en lugar de la newtoniana ($\dot{x}$). Fue uno de los pocos matemáticos de la época que, trabajando con las fluxiones de Newton, utilizó los signos de Leibniz. La adopción de elementos leibnizianos por parte de Cerdà fue más allá de la notación. A pesar del rechazo teórico del uso de los infinitésimos, el matemático catalán recurrió a ellos en alguna demostración y en varios capítulos combinó conceptos de las dos corrientes.



EN EL *TRATADO DE FLUXIONES* de Tomàs Cerdà se pueden encontrar numerosas aplicaciones geométricas del método fluxional, como es el cálculo de volúmenes de sólidos.

ARCHIVO DE LA REAL ACADEMIA DE LA HISTORIA DE MADRID

Por otro lado, tanto en el libro de Simpson como en la obra de Cerdà, enmarcados en el universo geométrico-cinemático newtoniano, el álgebra desempeña un papel esencial. Simpson manifestó explícitamente su admiración por el instrumento algebraico, que tanto utilizaban los matemáticos continentales. Cerdà siguió al autor británico en lo que se refiere a esta inclinación hacia el álgebra y, en cierta forma, la acentuó.

La orientación didáctica de Cerdà

Cerdà se rigió por el principio de la utilidad social de las matemáticas y la necesidad de transmitir este principio a los alumnos, el público destinatario de sus obras. Los manuales publicados, así como el texto manuscrito de los primeros capítulos del *Tratado de fluxiones*, perseguían, ante todo, un objetivo didáctico.

Ciertamente, el *Tratado de fluxiones* es una adaptación de *The doctrine and application of fluxions* de Simpson, pero no se trata de una simple traducción, sobre todo en lo que se refiere a los primeros capítulos. Precisamente una de las principales aportaciones de Cerdà en esta obra fue la acentuación del carácter didáctico de su discurso.

Por supuesto, hay que situar el trabajo del jesuita dentro de la corriente newtoniana, donde la noción de fluxión, como medida del movimiento generador de los elementos geométricos, es central. Pero, a pesar de ser un newtoniano convencido, Cerdà mostró una actitud abierta a las aportaciones de la visión leibniziana; en su legado vemos la influencia del cálculo diferencial continental.

En definitiva, en la obra de Cerdà prevaleció la voluntad pedagógica por encima de las discrepancias entre las distintas corrientes del cálculo diferencial que llegaban de Europa. IyC

PARA SABER MÁS

Historia de la invención del análisis infinitesimal y de su introducción en España. Norberto Cuesta Dutari. Universidad de Salamanca, 1976-1983.

Tratado de Astronomía. S. J. Tomas Cerdà. Interpretación del manuscrito, introducción editorial y notas a cargo de Lluís Gassiot i Matas. Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, 1999.

Isaac Newton on mathematical certainty and method. Niccolò Guicciardini. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, Londres, 2009.

Tratado de fluxiones (1757-1759). Tomàs Cerdà. Transcripción, notas e introducción editorial a cargo de Joaquim Berenguer Clarià. Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La secreta historia espiritual del cálculo. Amir Alexander en *IyC*, junio de 2014.

por Hannah A. Valentine



Hannah A. Valentine es la primera directiva responsable de la diversidad en la plantilla científica de los Institutos Nacionales de la Salud estadounidenses.

La ciencia tiene un problema de género

Las mujeres sufren diferentes formas de discriminación. Es necesario un cambio cultural

¿Reciben las científicas un trato imparcial cuando intentan desarrollar su carrera profesional? Según las investigaciones, la respuesta podría ser negativa. Un trabajo reciente publicado en *Academic Medicine* revela que existe una diferencia salarial de más de 18.000 euros que beneficia a los científicos varones. Otro estudio muestra indicios de parcialidad contra las mujeres a la hora de mantener una financiación estable para sus investigaciones, que es la savia de la carrera de cualquier científico.

En algunos aspectos, sin embargo, los datos son positivos. Las mujeres constituyen alrededor de la mitad de los doctorados en ciencia y medicina, y se contratan casi el mismo número de hombres y mujeres como profesores asociados. Asimismo, según algunos estudios, las mujeres blancas tienen la misma probabilidad que los hombres blancos de obtener las subvenciones para proyectos de investigación que otorgan los Institutos Nacionales de la Salud estadounidenses (NIH, por sus siglas en inglés); un primer paso crucial hacia la independencia profesional y la obtención de una plaza permanente. Con todo, los mismos estudios revelan que las científicas asiáticas y afroamericanas cuentan con menos probabilidades de recibir financiación, lo que apunta a una doble discriminación de género y de raza. Estos matices son importantes en el entorno hipercompetitivo de la captación de fondos para la investigación, en el que solo uno de cada tres científicos (hombres o mujeres) consigue la suficiente subvención de los NIH para mantener a flote un laboratorio.

Y existen muchos otros matices. Por ejemplo, una vez conseguido el capital para iniciar la investigación, las mujeres hallan trabas para continuar recibiendo fondos durante el tiempo suficiente para conseguir resultados. Tras obtener subvenciones durante tres o cuatro años, los científicos deben convencer a los NIH de que sus resultados ameritan seguir recibiéndolas para continuar con su trabajo. Un análisis de minería de textos sobre los comentarios de valoración de los proyectos de investigación reveló que los evaluadores utilizaban un mayor número de términos laudatorios, tales como «impresionante» y «excelente», para describir las solicitudes de las mujeres; sin embargo, estas recibían puntuaciones inferiores a las de sus colegas varones. Tal prueba sugiere que los evaluadores adoptan diferentes criterios para juzgar las solicitudes de las féminas.



Del mismo modo, desde los comienzos de su carrera profesional, las mujeres reciben menor financiación de las universidades: un cuarenta por ciento menos, de promedio, para instalar sus laboratorios. Los permisos laborales también se gestionan de forma diferente. Los hombres a menudo disfrutan de permisos remunerados «aceptados culturalmente», como los sabáticos, que no afectan a su sueldo. Las mujeres también se toman sabáticos, pero son más propensas que los hombres a solicitar licencias por motivos familiares, algo que se sigue estigmatizando. En muchos casos optan por renunciar a estos permisos. Es necesario cuestionar las políticas obsoletas e insensibles con la vida familiar. De la misma manera, deberíamos replantear el menosprecio del mundo académico por el profesorado a tiempo parcial, así como reconsiderar la compatibilidad familiar y laboral de los docentes como un impulso, y no como un obstáculo, para la carrera profesional. Sabemos que la flexibilidad en el trabajo puede mejorar la satisfacción personal e incluso el rendimiento.

Existe una solución sencilla para uno de los problemas, el de la retribución: exigir responsabilidades a los decanos y presidentes. La igualdad salarial debería ser un elemento esencial en las evaluaciones de la capacidad de liderazgo y gestión. Un análisis reciente de los NIH reveló que el grupo de los afroamericanos resultaba perjudicado a la hora de obtener subvenciones; sus solicitudes reciben bastante menos financiación que las de los científicos blancos (el 11 frente al 17 por ciento). Los NIH están averiguando si la eliminación de todos los identificadores personales en las solicitudes influye en la manera de puntuarlas; de ser así, también podría afectar al modo en que se revisan las solicitudes de las mujeres. Por último, debemos abordar el problema del acoso sexual, que afecta a ambos sexos pero en mayor proporción a las mujeres.

Las científicas aportan perspectivas únicas a la investigación, y el país necesita las mejores ideas posibles. Hallar la solución a este problema interesa a todos por igual; para progresar es necesario que se produzca un cambio cultural tanto en los hombres como en las mujeres. La discriminación no suele ser intencionada, pero los estereotipos, inconscientes y a menudo involuntarios, derivan en comportamientos sesgados que afectan sobremanera a la satisfacción, la productividad y el desarrollo profesionales. Nuestro fracaso a la hora de eliminar las desigualdades que padecen las mujeres en la ciencia representaría un fracaso para ambos sexos por igual y también para la investigación biomédica. IyC

VIDHYA NAGARAJAN

por Pere Castells



Pere Castells, experto en ciencia y cocina, es colaborador del proyecto Gastrocultura Mediterránea.

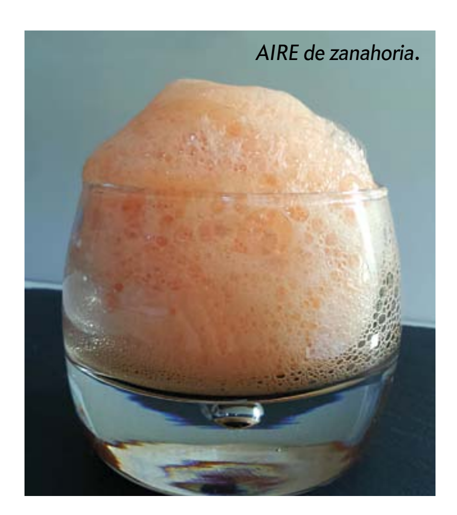
La importancia de las espumas en la cocina

Cuando la combinación de un líquido y un gas se convierte en un sólido

Para un químico físico, una espuma corresponde a una dispersión coloidal, o coloide, en la que el medio de dispersión es un líquido, y la fase dispersa, un gas. Si bien parece un sistema simple, los científicos llevan siglos intentando entender y predecir sus propiedades fundamentales. En 1999, los físicos Denis Weaire y Stefan Hutzler publicaron *The physics of foams* («La física de las espumas»), un libro de referencia que recopilaba la información científica disponible sobre espumas y animaba a los investigadores de este campo a avanzar en el estudio de estos procesos dinámicos. En 2013, los matemáticos de la Universidad de California en Berkeley James A. Sethian y Robert Saye publicaban en *Science* un modelo de la evolución de una espuma en tres etapas: construcción de la estructura, fluencia del líquido por las finas membranas, y estallido de la burbuja y reinicio del proceso [*véase* «La evolución de las espumas», por John Matson; Investigación y Ciencia, noviembre de 2013].

David A. Weitz es uno de los científicos que más está estudiando la aplicación de las espumas a diversos ámbitos. Desde la Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas (SEAS) de la Universidad Harvard está desarrollando métodos para obtener emulsiones y espumas «de diseño», mediante dispositivos microfluídicos. Weitz no dudó en organizar en 2010 el curso *Science and cooking* en Harvard para aprovechar la creatividad que se estaba generando en el mundo de la gastronomía y trasladarla a otros ámbitos como el desarrollo de nuevos materiales. Sus conversaciones con Ferran Adrià sobre ciencia y gastronomía resultaron apasionantes.

En la cocina, las espumas han sido habituales a lo largo de la historia. Sin embargo, hasta hace poco se restringían a montados de lácticos o clara de huevo y poco más. Las *mousses* eran las estrellas. En los años noventa del siglo pasado, Adrià comenzó a experimentar con nuevas espumas usando el sifón y el óxido de dinitrógeno (N_2O) como gas incorporado. Elaboraciones como las espumas de *foie*, bacalao, patatas o setas empezaron a prodigarse en la cocina del restaurante El Bulli y se fueron extendiendo por el mundo culinario. Heston Blumenthal, Wylie Dufresne, Andoni Aduriz, Grant Achatz y muchos otros las hicieron suyas y las introdujeron en sus cocinas. La facilidad de uso que ofrecía el sifón favoreció la llegada de esta técnica a cocinas modestas y bares. Ya es habitual servir espumas en banquetes, cócteles y otros eventos.



AIRE de zanahoria.

CORTESÍA DE JORDI GUILLEM

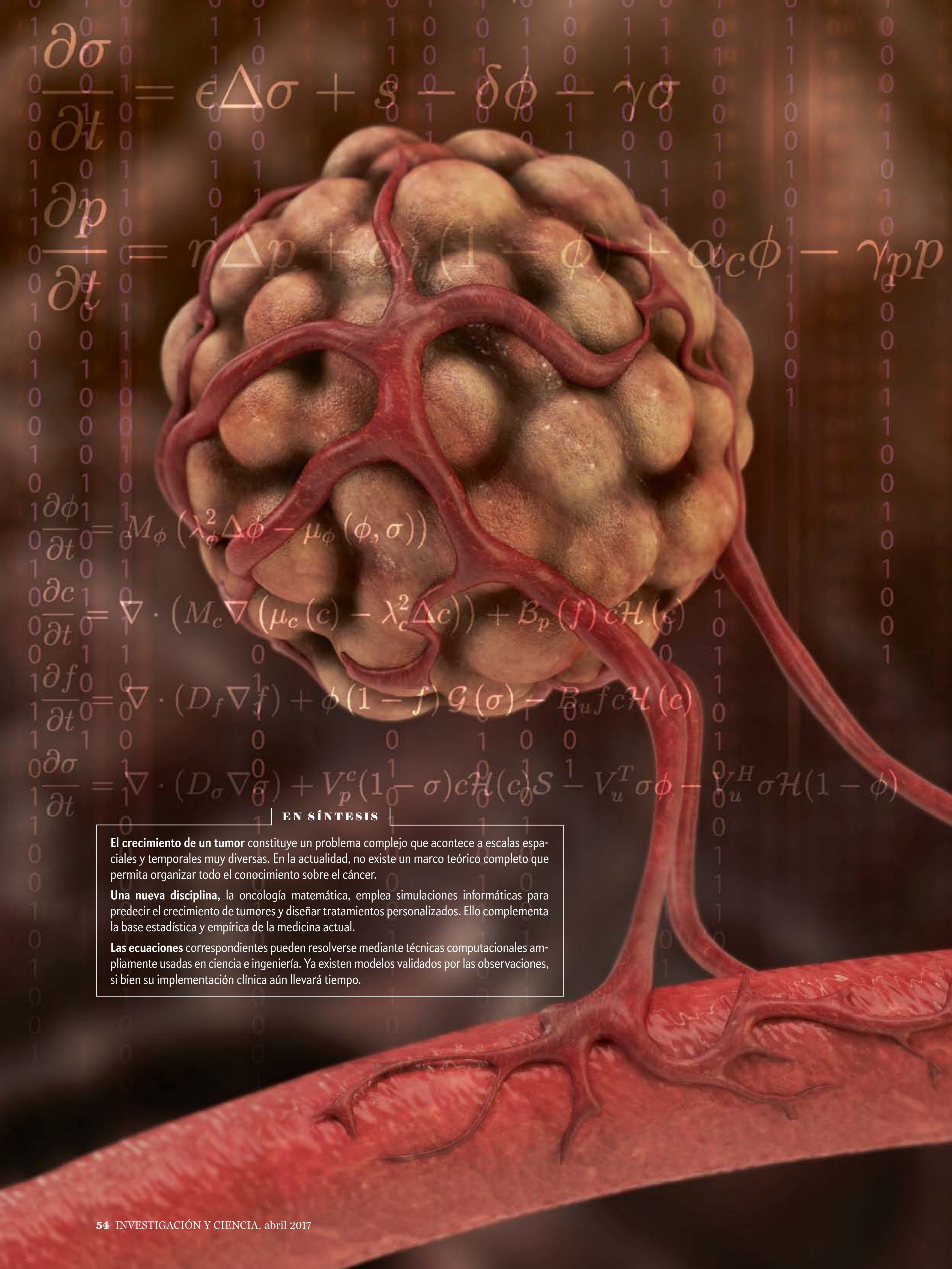
En el año 2003 se produjo un cambio de técnica. Adrià imaginaba espumas alimentarias con una gran proporción de aire (como las que se forman en el jabón del baño). Curiosamente, este tipo de espumas vino de la mano de un aparato bien simple: el brazo triturador. Culinariamente se las denomina «aires» y fueron portada del suplemento del *New York Times* justamente en agosto de 2003, año de su introducción. Así, el *Aire de zanahoria* de Ferran Adrià daba la vuelta al mundo y se convertía en símbolo de esta nueva textura tan «aérea».

La receta era muy fácil: a un licuado de zanahoria se le introducía aire mediante un brazo triturador en un recipiente amplio. Este debía ser grande para que no se destruyera la espuma a medida que se formaba. La zanahoria contiene emulsionantes que actúan como espumantes y a la vez estabilizantes. De ahí que la introducción de aire mediante el agitador bastara para construir estructuras espumosas estables. También con regaliz o remolacha se obtenían resultados similares.

Sin embargo, los cocineros querían aplicar la técnica a todo tipo de licuados. El uso de la lecitina permitió preparar espumas de tipo «aire» a partir de cualquier líquido (incluida el agua), aunque este careciera de espumantes. Las investigaciones gastronómico-científicas continuaron para encontrar otros productos con funciones similares a la lecitina. Así empezó a usarse el sucroester como agente espumante; conseguía espumas de tipo «aire» con burbujas más pequeñas, lo que mejoraba su estabilidad y, por tanto, permitía extender la técnica a bebidas alcohólicas. En forma de «aire» de ginebra y de ron, las espumas comenzaron a llegar a las coctelerías.

En la actualidad, este tipo de dispersiones coloidales se elaboran en cocinas de todo el mundo. Por su textura, se aplican también en la elaboración de dietas blandas para colectivos con necesidades especiales (el «aire» de remolacha roja es ya un clásico en diversos geriátricos alemanes). Las espumas han llegado incluso a la Estación Espacial Internacional, cuyas condiciones de ingravidez permiten estudiar el comportamiento y estabilidad de estos sistemas.

Los avances cosechados por la innovación gastronómica en espumas pueden arrojar luz sobre las propiedades fundamentales de estos coloides y, al propio tiempo, contribuir al desarrollo de materiales ignífugos, espumas para cascos y otros productos ajenos a las artes culinarias. IyC



EN SÍNTESIS

El crecimiento de un tumor constituye un problema complejo que acontece a escalas espaciales y temporales muy diversas. En la actualidad, no existe un marco teórico completo que permita organizar todo el conocimiento sobre el cáncer.

Una nueva disciplina, la oncología matemática, emplea simulaciones informáticas para predecir el crecimiento de tumores y diseñar tratamientos personalizados. Ello complementa la base estadística y empírica de la medicina actual.

Las ecuaciones correspondientes pueden resolverse mediante técnicas computacionales ampliamente usadas en ciencia e ingeniería. Ya existen modelos validados por las observaciones, si bien su implementación clínica aún llevará tiempo.



MEDICINA

LAS ECUACIONES DEL CÁNCER

Los avances en la modelización y simulación numérica del crecimiento tumoral han dado lugar al nacimiento de una nueva disciplina: la oncología matemática. Gracias a ella comienza a avistarse el tratamiento personalizado de esta devastadora enfermedad

Guillermo Lorenzo, Guillermo Vilanova y Héctor Gómez

Guillermo Lorenzo es investigador en la Universidad de La Coruña. Su trabajo se centra en el desarrollo de modelos matemáticos y métodos computacionales para simular el crecimiento del cáncer de próstata.

Guillermo Vilanova es investigador en la Universidad de La Coruña. Estudia nuevas técnicas para modelizar y simular la angiogénesis tumoral.

Héctor Gómez es profesor de ingeniería mecánica en la Universidad Purdue. Sus líneas de investigación abordan el desarrollo de nuevas técnicas de modelización y simulación para resolver problemas de ingeniería, física y ciencias de la salud.



EL CÁNCER CONSTITUYE UNO DE LOS MAYORES ENEMIGOS DE LA SALUD HUMANA de nuestra era. Los diversos tipos de tumores son una de las principales causas de muerte en todo el mundo y suponen el origen de un amplio grupo de patologías de gran incidencia. El aumento de la esperanza de vida y la creciente exposición a sustancias cancerígenas en nuestro entorno han llevado en gran medida a esta situación.

Investigadores y profesionales de todo el planeta se dedican a estudiar los mecanismos de crecimiento del cáncer y a idear nuevas formas de detectar y eliminar los tumores. Ante la gran variedad de circunstancias que pueden intervenir en el origen y la evolución de un tumor, la estadística se presenta como una herramienta cuantitativa de enorme utilidad para determinar qué factores intervienen de forma significativa.

Nuestro conocimiento del cáncer se basa en los resultados experimentales, en las regularidades estadísticas que se observan en esas investigaciones y en la experiencia acumulada por los facultativos que tratan estas patologías. Todo ese conocimiento se traslada después a la práctica médica mediante protocolos de asistencia clínica. Estos incluyen programas de prevención, métodos de cribado de la población más vulnerable a tipos concretos de cáncer, elaboración de cuadros de diagnóstico y recomendaciones de tratamiento y seguimiento. Atendiendo a una serie de variables clínicas, los pacientes suelen clasificarse en grupos de riesgo, con el fin de asignar a cada uno protocolos de tratamiento y seguimiento más específicos.

Hoy por hoy, sin embargo, buena parte de los datos de los que disponemos son fragmentarios. Aún carecemos de un modelo teórico que conecte todos los resultados de la investigación básica y clínica sobre cada tipo de cáncer y que nos permita interpretarlos de forma conjunta. Si lográsemos integrar toda esa información, podríamos entender los mecanismos clave de la enfermedad y derivar estrategias de atención clínica más precisas para cada paciente.

Las matemáticas pueden ayudarnos en este reto. Partiendo de lo que sabemos sobre un determinado tipo de tumor, resulta posible diseñar reglas y ecuaciones que describan los aspectos principales de su crecimiento, así como tener en cuenta el efecto de un tratamiento concreto. Ese conjunto de reglas y ecuaciones es lo que llamamos un modelo matemático del cáncer. Estos modelos, los cuales pueden entenderse como una representación aproximada del fenómeno real, integran el conocimiento clínico y experimental de la enfermedad y también el de sus tratamientos, lo que permite analizar los datos en conjunto. Además, las ecuaciones empleadas suelen ser comunes a otras disciplinas científicas y a campos de la ingeniería, por lo que disponemos de técnicas avanzadas para resolverlas.

Dadas las ecuaciones del modelo, su solución nos permite simular en un ordenador la evolución del tumor en el tiempo y en el espacio, lo que proporciona información clínica de gran utilidad para el diagnóstico, tratamiento y seguimiento de la enfermedad. Es más, los actuales protocolos médicos solo permiten una individualización moderada de la asistencia clínica y de la terapia, lo que en ocasiones deriva en situaciones de sobretratamiento (fuertes efectos secundarios evitables) o infratratamiento (cuando un tumor no se erradica por completo y vuelve a crecer). En cambio, los modelos matemáticos pueden adecuarse a cada paciente, lo que posibilita diseñar terapias optimizadas para cada uno. La historia clínica del sujeto y las imágenes médicas, como resonancias magnéticas o tomografías computarizadas, nos proporcionan los valores de los parámetros que definen el modelo, así como la geometría del tumor y del órgano afectado. Ante nuevos datos clínicos o nuevas imágenes, tales parámetros pueden actualizarse para lograr una predicción más precisa del crecimiento tumoral.

El empleo de modelos matemáticos para predecir el avance de un tumor y diseñar tratamientos personalizados constituye la base de una nueva y prometedora disciplina: la oncología matemática. En los últimos años, este enfoque ha demostrado un enorme potencial para complementar los protocolos médicos ya existentes y para trazar estrategias clínicas que permitan combatir el cáncer de forma precisa, individualizada y eficiente.

UN PROBLEMA COMPLEJO Y MULTIESCALA

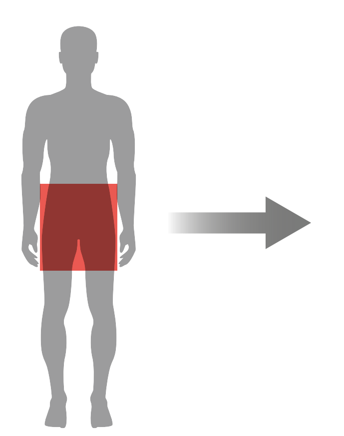
Con el término *cáncer* nos referimos en realidad a un conjunto muy amplio de enfermedades. Todas ellas se caracterizan por la existencia de un proceso anómalo de división celular, pero por lo demás revisten una diversidad más que considerable. Las distintas clases de cáncer se clasifican según el tipo de célula y

PÁGINAS ANTERIORES: © ARINARICI/ISTOCKPHOTO (*ilustración*); CORTESÍA DE LOS AUTORES (*ecuaciones*); INVESTIGACIÓN Y CIENCIA (*composición*)

Predicciones personalizadas

El cáncer engloba a toda una variedad de patologías complejas para las que aún no existe un modelo teórico que conecte todo el conocimiento científico y clínico disponible. Además, la base estadística y experimental de los protocolos médicos vigentes solo permite una individualización moderada de la asistencia clínica y la terapia.

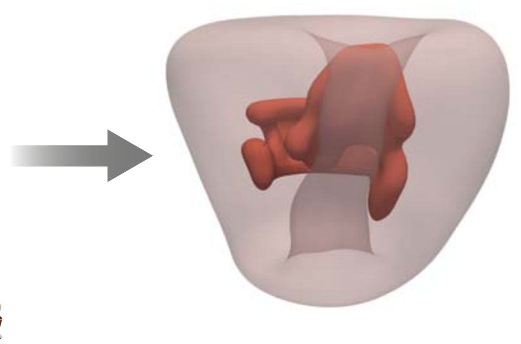
En los últimos años, los avances en modelización y simulación numérica han dado lugar al nacimiento de la oncología matemática, una nueva disciplina que busca formular modelos predictivos del crecimiento tumoral para simular su evolución en un ordenador. Uno de sus pilares reside en la posibilidad de introducir datos específicos de cada paciente, lo que permite personalizar la simulación del progreso de la enfermedad y diseñar tratamientos individualizados. Esta secuencia de imágenes ilustra el proceso predictivo en el caso de un tumor prostático.



Toma de datos del paciente
Los datos que se introducirán en el modelo proceden de la historia clínica del sujeto y de sus imágenes médicas, como resonancias magnéticas o tomografías axiales computarizadas (TAC).



Reconstrucción tridimensional de la zona afectada
A partir de esos datos se elabora un modelo tridimensional de la región anatómica afectada (en este ejemplo, la zona pélvica y abdominal). La información incluida en la historia clínica (tacto rectal, ecografía transrectal y biopsia) permite estimar la morfología del tumor y los parámetros del modelo matemático.



Simulación del crecimiento tumoral
Una vez obtenida toda la información relevante, el modelo matemático permite realizar una simulación computarizada para predecir cómo será el crecimiento del tumor (*marrón*) sobre la geometría específica de la próstata del paciente.

tejido en el que se origina el tumor; es decir, la masa de células que comienza a reproducirse de manera anormal.

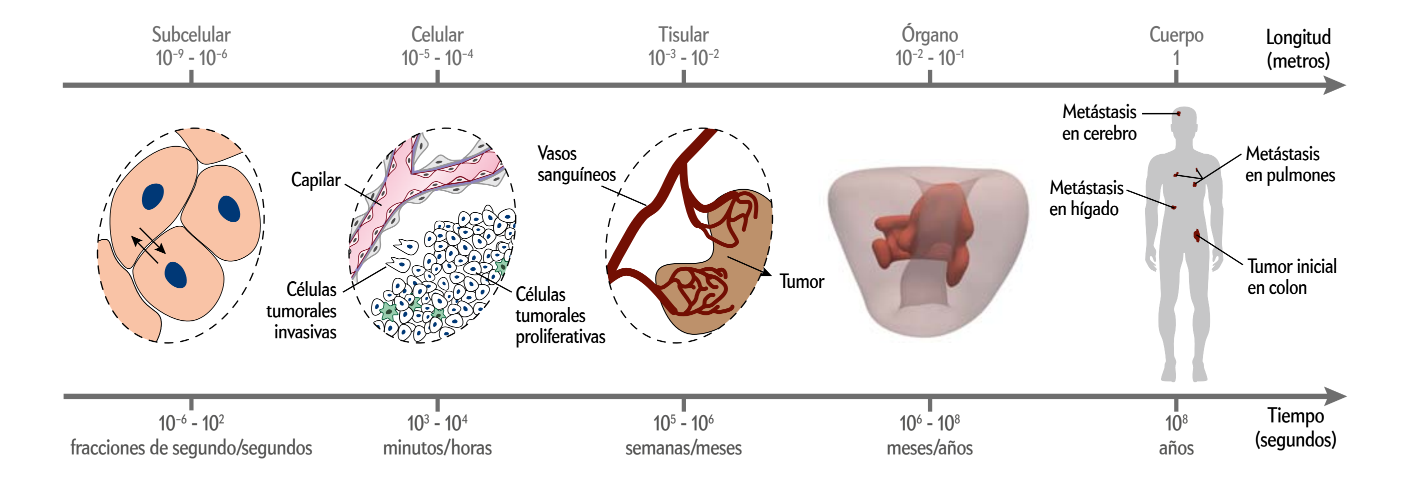
Los tumores surgen y se desarrollan debido a la acumulación de alteraciones en el ADN, como mutaciones y cambios epigenéticos. Algunas mutaciones pueden heredarse de los progenitores, si bien las alteraciones que inducen un tumor suelen surgir de manera aleatoria durante la vida del individuo debido a errores en la replicación del material genético o a la exposición a sustancias cancerígenas. Diversos factores externos, desde la dieta y otros hábitos de vida hasta el entorno de la persona, pueden fomentar la aparición de dichas alteraciones genéticas.

Existen mecanismos moleculares que permiten a las células controlar la calidad de su genoma, detectar tales alteraciones y provocar el suicidio celular, o apoptosis, lo que evita la propagación de daños genéticos. No obstante, esta barrera de seguridad no siempre funciona: en ocasiones, las células tumorales logran evadir estos mecanismos de control.

Las células tumorales presentan un comportamiento «asocial y competitivo». Su conducta se caracteriza fundamentalmente por una mayor proliferación y por la tendencia a invadir tejidos cercanos. Las células de la mayoría de los tejidos de nuestro cuerpo se renuevan continuamente, sujetas a un riguroso equilibrio entre proliferación y muerte celular. El cáncer rompe ese balance. El aumento de la proliferación puede deberse a alteraciones genéticas que producen un incremento de la reproducción celular, a una disminución de la muerte celular, o a una combinación de ambos procesos.

En el año 2000, Douglas Hanahan, ahora en la Escuela Politécnica Federal de Lausana, y Robert A. Weinberg, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, detectaron que, además de la conducta invasiva y una mayor tasa de proliferación, el cáncer presentaba otras señas de identidad. Su trabajo, de gran influencia y en continuo desarrollo, ha permitido señalar actualmente otras seis funciones clave que caracterizan el crecimiento tumoral: alteración del metabolismo celular; acumulación de sucesivas alteraciones genéticas; evasión de los mecanismos de supresión del crecimiento; resistencia a los ataques del sistema inmunitario; creación de un entorno tumoral propicio, y formación de nuevos vasos sanguíneos que alimenten el tumor. Este último proceso, de gran importancia en el desarrollo tumoral, recibe el nombre de angiogénesis.

La angiogénesis comienza cuando, en situaciones de hipoxia (falta de oxígeno y nutrientes), las células tumorales producen un factor de crecimiento que induce el desarrollo de los vasos sanguíneos cercanos y los atrae hacia ellas. Los capilares incipientes crecen y se conectan entre sí, dando lugar a una red vascular capaz de transportar nutrientes y oxígeno para satisfacer las grandes demandas del tumor.



LAS ESCALAS DEL CÁNCER: El crecimiento de un tumor sólido constituye un fenómeno en el que intervienen múltiples escalas, tanto espaciales como temporales. Esta variabilidad constituye uno de los mayores obstáculos a los que deben enfrentarse los modelos matemáticos del crecimiento tumoral.

Algunas células malignas pueden adquirir la capacidad de independizarse de la masa tumoral, entrar en los vasos sanguíneos o linfáticos, viajar a otra parte del cuerpo y crear un tumor secundario. Dicho fenómeno se conoce como metástasis. La capacidad para colonizar un tejido distinto también pasa por la alteración de determinados genes. Además, la angiogénesis genera vasos sanguíneos con diferentes diámetros, múltiples brazos y elevada permeabilidad, lo que supone una vía de escape para esas células independientes. Así pues, el crecimiento del tumor puede poner en peligro la estructura y el buen funcionamiento no solo del tejido en el que se origina, sino también de otros.

La mayoría de los tumores sólidos pasan por cuatro fases de crecimiento: proliferación local, proliferación extensiva confinada al tejido original, invasión de tejidos cercanos y metástasis. El paso de una fase a otra obedece a una progresiva adquisición de nuevas habilidades por parte de las células malignas, así como a la generación de un entorno favorable. De esta manera, el tumor logra romper las barreras que, en circunstancias normales, limitarían su crecimiento en cada instante.

Con todo lo anterior queremos poner de relieve que en el desarrollo de un tumor intervienen escalas espaciales muy distintas: desde la masa celular inicial, con una longitud de milésimas de milímetro, hasta la fase de metástasis, con múltiples tumores de varios centímetros. También los procesos implicados suceden a diferentes escalas: subcelular (metabolismo y mutaciones), celular (división y adhesión intercelular), tisular (angiogénesis e invasión de tejidos) y corporal (metástasis). Asimismo, estos procesos se desarrollan en escalas temporales muy diversas. Mientras que el metabolismo opera en fracciones de segundo, la división celular puede llevar horas, y la invasión de tejidos, meses o incluso años. Esta disparidad de escalas espaciales y temporales constituye una de las principales dificultades en el estudio del cáncer, tanto desde el ámbito de las ciencias médicas como desde la óptica de las matemáticas.

Otro gran escollo se debe a que el número y tipo de alteraciones genéticas que originan un mismo tipo de tumor puede variar de un paciente a otro. Además, un tumor puede presentar varios grupos de células cancerosas con distintos patrones de alteración genética, lo que se traduce en diferencias de metabolismo, entorno local y capacidad invasiva. ¿Cómo lidiar con semejante complejidad?

LAS VARIABLES DE UN MODELO

El diseño de un modelo matemático del crecimiento tumoral comienza por decidir qué fenómenos deben incorporarse para explicar el avance de un determinado tipo de cáncer. Es en este momento cuando se intenta integrar el conocimiento existente sobre la patología a todas las escalas y en los distintos campos científicos. Sin embargo, la inclusión de todos esos datos daría lugar a un modelo excesivamente complejo, difícil de resolver y con escasa aplicabilidad clínica. Por ello, resulta indispensable seleccionar los fenómenos más representativos del crecimiento tumoral, definir qué variables permitirán estudiarlo y plantear las ecuaciones que describirán el proceso.

Los modelos de cáncer únicamente suelen contemplar qué sucede en el órgano que alberga el tumor o en una región de tejido, ya que considerar todo el cuerpo exigiría un coste computacional prohibitivo. Así pues, todo modelo debe completarse con condiciones de contorno e iniciales. Las primeras reflejan qué sucede alrededor de la región anatómica considerada. Las segundas determinan la distribución espacial de las variables a «tiempo cero»; es decir, en el momento en el que comienza la simulación.

En cuanto a los tipos de tejido, todos los modelos de crecimiento tumoral incorporan alguna variable que permita distinguir el tejido sano del canceroso. También resulta posible incluir varias especies tumorales, o «fases», las cuales pueden atender a distintas clasificaciones según su genética, metabolismo o grado de resistencia a un tratamiento, entre otras posibilidades. En tal caso, el modelo incorpora también los procesos de interacción entre fases, que pueden ser de competencia, colaboración o de transferencia de una a otra. También pueden incluirse fases para los distintos tipos de tejido sano, para la matriz extracelular o incluso para el agua intersticial.

Por último, en lo que respecta a los procesos más relevantes, los modelos matemáticos suelen tener en cuenta la tasa de proliferación neta y la invasión del tejido sano por parte de las células malignas. Otros procesos que también se incluyen a menudo son el consumo y la producción de sustancias clave (nutrientes, factores proangiogénicos, metabolitos o biomarcadores) y la manera en que su concentración afecta al crecimiento del tumor. En particular, es común incorporar fenómenos de «taxis»; es decir, movimientos celulares inducidos

por gradientes en la concentración de sustancias (quimiotaxis) o por las propiedades mecánicas del entorno (mecanotaxis), entre otros. También pueden incluirse los efectos de un tratamiento sobre las células malignas, así como otros fenómenos, como la elasticidad de los tejidos, el riego sanguíneo o diversas funciones fisiológicas.

MODELOS DISCRETOS Y CONTINUOS

Una vez definidas las variables del modelo, hemos de decidir cómo tratar el espacio y el tiempo. A este respecto caben dos posibilidades: los modelos discretos y los continuos.

Para estudiar los fenómenos que tienen lugar a escala subcelular o celular, como las interacciones entre las células sanas y las tumorales, suele elegirse una formulación discreta. Para ello, primero se define la región de tejido que incluye el tumor y una porción de tejido sano circundante. En algunos casos, dicha región se subdivide en una fina retícula que determina las posiciones que pueden ocupar las células; en otros, las células se tratan como pequeños recintos que pueden situarse en cualquier lugar dentro de la zona considerada. Después, se define una duración de la simulación y se subdivide en pequeños intervalos de tiempo, limitados por los instantes en los que se calculará el avance del tumor. Estos modelos se componen de reglas de comportamiento de cada una de las células en cada instante; por ejemplo, estableciendo cuándo y cómo nutrirse, moverse, dividirse o morir. Por esta razón, algunos de estos modelos se denominan «autómatas celulares».

Las concentraciones de las sustancias clave para el crecimiento tumoral pueden incorporarse por medio de variables continuas, cuyas variaciones se expresan con ecuaciones en derivadas parciales. En 2005, gracias a este enfoque, Philip K. Maini, Helen M. Byrne y Tomás Alarcón desarrollaron en la Universidad de Oxford un modelo discreto completo de crecimiento tumoral que incluía fenómenos a escala subcelular, celular y tisular.

La principal limitación de los modelos discretos se debe a la dificultad que entraña aumentar la escala espacial para considerar todo el órgano que alberga el tumor, ya que el número de células que haría falta incluir requeriría una potencia computacional desmedida. Además, los fenómenos a escala celular o subcelular suceden generalmente a escalas de tiempo más cortas que las que caracterizan el crecimiento global del tumor. Por ello, las simulaciones discretas se ven limitadas temporalmente a pocos días o meses.

Por su parte, los modelos continuos permiten describir el crecimiento tumoral a mayor escala y durante tiempos del orden de años con un menor coste computacional, pero lo hacen a costa de reducir la precisión espacial y temporal de los fenómenos representados. En vez de realizar un seguimiento de cada célula, se emplean funciones continuas que describen cómo varía la densidad celular en el espacio y en el tiempo. Esto permite saber qué partes de un órgano se hallan afectadas por el tumor, así como calcular el volumen y la extensión de este, si bien no podemos conocer la posición y el comportamiento de cada célula tumoral. Por tanto, ciertos fenómenos que ocurren a escala celular no pueden transferirse directamente a los modelos continuos, siendo necesario realizar una adaptación matemática para incluirlos. Estos modelos suelen completarse con un conjunto de variables también continuas, las cuales reflejan la concentración de sustancias clave para el desarrollo del cáncer.

Los modelos continuos consisten en un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales, las cuales describen cómo evoluciona la densidad de cada sustancia y tipo de célula. Los términos de estas ecuaciones suelen ser de cuatro clases: difusión, convección, reacción y taxis. Los términos de difusión y convección representan a gran escala la migración celular. Son habituales en múltiples fenómenos de la ciencia, como el transporte de calor o electricidad. Los términos de reacción reflejan fenómenos celulares a gran escala, como la proliferación, metabolismo o interacción entre las distintas fases celulares. Los términos de taxis pueden adoptar una forma semejante a los de difusión, convección o reacción. La dinámica de las sustancias participantes en el modelo se describe a menudo mediante ecuaciones de reacción-difusión, mientras que el efecto de tratamientos como la radioterapia y la quimioterapia puede incluirse a través de un término reactivo en las ecuaciones de las fases tumorales afectadas. La quimioterapia suele requerir una ecuación de reacción-difusión adicional para dar cuenta de la dinámica de los fármacos empleados.

Los modelos predictivos del cáncer han de equilibrar el trinomio formado por complejidad, precisión y aplicabilidad clínica

PREDECIR EL CRECIMIENTO TUMORAL

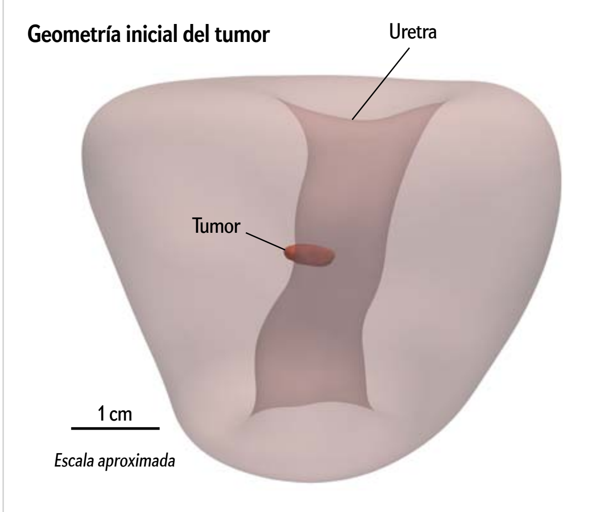
En los últimos tres años, nuestro grupo de investigación ha desarrollado un modelo continuo capaz de reproducir resultados experimentales y patrones clínicos de crecimiento de tumores prostáticos. Nuestro modelo emplea una técnica bastante extendida para representar de forma continua la interacción entre el tejido sano y el tumoral: el método de campo de fase. Este consiste en definir una variable, el campo de fase, la cual toma valores entre 0, correspondiente al tejido sano, y 1, que indica tejido tumoral. Dicha variable permanece constante en cada tipo de tejido y exhibe una transición suave de uno a otro. La interfaz entre ambos corresponde al valor 0,5, de modo que el conjunto de puntos del espacio con esa cifra permite definir la extensión del tumor y calcular su volumen. El modelo se completa con dos ecuaciones de reacción-difusión: una para describir la dinámica de un nutriente genérico, y otra para incorporar la producción del antígeno prostático específico (PSA, por sus siglas en inglés), una proteína sintetizada por la próstata y usada como biomarcador. Los parámetros de nuestro modelo se obtienen de estudios previos en oncología y matemática aplicada.

Al usar el modelo sobre la anatomía de la próstata extraída de una imagen por tomografía computarizada de un paciente, hemos logrado reproducir patrones tridimensionales de crecimiento de este tipo de tumor. En particular, nuestro modelo nos ha permitido describir el cambio entre dos geometrías de crecimiento habituales, de esferoidal a ramificada. Las simulaciones parecen indicar que dicho cambio constituye una respuesta tumoral para favorecer el acceso a los nutrientes y evitar la formación de un núcleo interior hipóxico o necrótico. Las predicciones relativas al volumen tumoral y a los valores del PSA también resultan análogas a los resultados observados en pacientes con cáncer de próstata.

El crecimiento tumoral en un ordenador

Una vez definido el modelo y obtenidos los datos del paciente, el avance de la enfermedad puede simularse en un ordenador. El grupo de investigación de los autores ha desarrollado varios modelos matemáticos del crecimiento tumoral; entre ellos, uno capaz de predecir la evolución del cáncer de próstata y otro relativo a la angiogénesis, el proceso por el que un tumor atrae hacia sí los vasos sanguíneos cercanos para alimentarse y crecer.

Geometría inicial del tumor

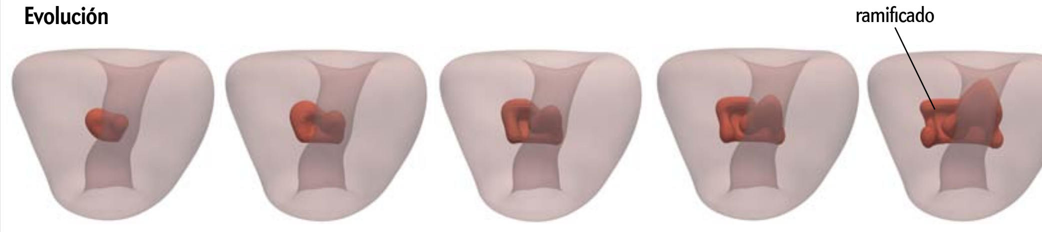


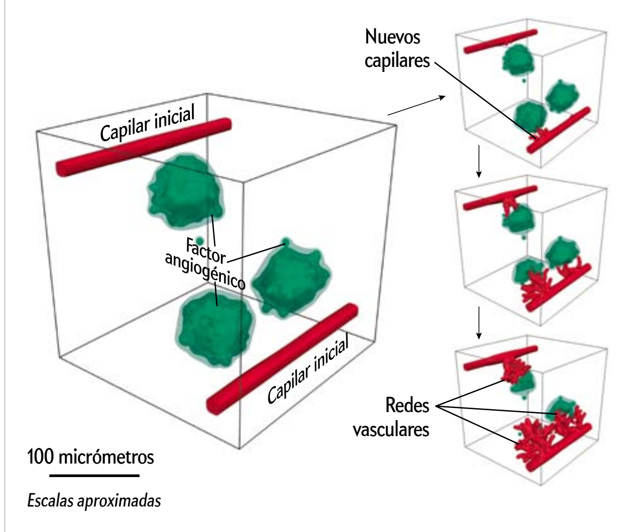
Cáncer de próstata

Evolución del tumor prostático (*marrón*) de un paciente a partir de la geometría inicial (*izquierda*) proporcionada por las imágenes médicas. Las distintas vistas (*abajo*) corresponden a varios instantes de tiempo en el curso de la simulación.

El modelo permite calcular con gran precisión la extensión y el volumen del tumor. En ese caso, también predice una evolución ramificada, en lugar de esferoidal (dos geometrías de crecimiento habituales en el cáncer de próstata).

Evolución





Capilar inicial

Tumor

Zona necrótica

100 micrómetros

Crecimiento local

Desaparición de la zona necrótica

Angiogénesis

Un tumor multifocal, caracterizado por células con bajos niveles de oxígeno o nutrientes (*no mostradas*), genera un factor de crecimiento (*verde*) que hace crecer los vasos sanguíneos cercanos (*rojo*). Las células vasculares de los capilares ya existentes reaccionan creando una nueva red vascular que alimenta el tumor. Esta simulación predice la evolución de todo el proceso, lo que permite caracterizar en tres dimensiones la localización y la forma de la nueva red capilar.

Acoplado a un modelo de crecimiento tumoral, el mismo modelo de angiogénesis predice también un crecimiento local del tumor. La aportación de nutrientes y oxígeno causada por los nuevos vasos fomenta la desaparición progresiva de una zona necrótica (*marrón oscuro*) existente en la fase inicial del tumor.

Los sistemas de ecuaciones diferenciales de los modelos continuos no suelen tener una solución exacta. Por ello, se intenta calcular una buena aproximación mediante técnicas de mecánica computacional, la disciplina orientada al estudio y desarrollo de métodos informáticos para resolver problemas científicos e ingenieriles.

Una herramienta muy habitual en este contexto es el método de elementos finitos. Este comienza por aproximar la geometría del órgano mediante una retícula formada por pequeños recintos, o «malla de elementos». Después, sobre cada uno de ellos se define una serie de funciones conocidas, cuyas combinaciones lineales permiten aproximar la solución. Así pues, el problema se convierte en hallar los coeficientes de dicha expansión lineal para cada variable del modelo. Existen diversas técnicas que permiten transformar el sistema original de ecuaciones en derivadas parciales en un sistema de ecuaciones algebraicas cuyas incógnitas son los coeficientes que estamos buscando. Se conocen multitud de algoritmos ampliamente usados en ciencia e ingeniería para resolver el sistema algebraico resultante y, de esta manera, obtener una buena aproximación a la solución del problema de partida. En general, cuanto menores sean los elementos de la malla, más precisión podremos alcanzar, pero el coste computacional requerido será mayor.

Los algoritmos que hemos empleado para resolver nuestro modelo de cáncer de próstata están basados en una innovadora técnica: el análisis isogeométrico, desarrollado en 2005 por Thomas J. R. Hughes, J. Austin Cottrell y Yuri Bazilevs en el Instituto de Ingenieria y Ciencias Computacionales de la Universidad de Texas en Austin. Esta aplicación del método de elementos finitos se basa en emplear, en el cálculo de la solución, las funciones usadas para representar la geometría del problema en programas de diseño por ordenador (CAD, *computer aided design*). Ello permite comenzar con una representación de la anatomía de la próstata más detallada que la obtenida con métodos tradicionales, así como lograr una mayor precisión y eficiencia en la resolución del sistema de ecuaciones.

Para reducir el consumo de memoria y el tiempo de simulación, empleamos una técnica conocida como «adaptatividad local dinámica». En ella, los elementos de la malla son menores cerca de la interfaz entre el tejido sano y el tumoral, y mayores dentro de cada una de estas regiones. A medida que la interfaz va evolucionando, la malla se adapta a la nueva geometría, lo que permite incrementar la precisión donde más hace falta y ahorrar potencia de cómputo allí donde la solución apenas varía.

Existen también modelos híbridos, en los que algunas fases celulares se describen de manera discreta y otras de forma continua. La principal dificultad en estos casos reside en acoplar aquellos fenómenos que suceden a escalas muy distintas en cada fase celular. Uno de los procesos que suelen abordarse por medio de esta técnica es la angiogénesis. En esta línea, un modelo reciente desarrollado por Vittorio Cristini, de la Universidad de Nuevo México, y sus colaboradores combina varias fases celulares continuas con una discreta, la cual incorpora los nuevos capilares generados por la angiogénesis.

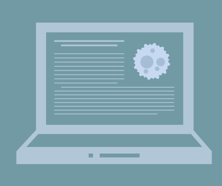
Los modelos híbridos también combinan descripciones discretas y continuas pero aplicadas a una misma fase celular, con el objetivo de reflejar los fenómenos en los que dicha fase interviene a varias escalas. Nuestro grupo ha empleado este enfoque para modelizar la angiogénesis. Un papel protagonista en este proceso lo desempeñan las células endoteliales; es decir, las que recubren el interior de los vasos sanguíneos. De ellas, las conocidas como células endoteliales «estrelladas» integran fenó-

APLICABILIDAD

Del laboratorio a la clínica

A pesar de los avances logrados durante los últimos años en el desarrollo de modelos matemáticos del cáncer, su implementación en los protocolos médicos aún tendrá que esperar. Antes de llegar a la clínica, los modelos deberán superar una serie de etapas largas y complejas (*abajo*). En la actualidad existen varios modelos prometedores y validados por las observaciones, pero aún no han sido objeto de un ensayo clínico.

Diseño
El diseño del modelo requiere seleccionar los fenómenos más significativos que intervienen en la evolución de un tumor, definir las variables que se usarán para medirlos y escribir las reglas y ecuaciones correspondientes.



Validación
Las observaciones deben demostrar que el modelo es capaz de reproducir con la precisión deseada los fenómenos seleccionados.



Ensayo clínico
La principal prueba científica de que un modelo predictivo resulta adecuado es un ensayo clínico: un estudio intervencionista en el que unos pacientes reciben el protocolo estándar y otros son atendidos según el modelo.



Transferencia
Sobre la base de los ensayos clínicos, la transferencia a la clínica comienza por la inclusión del modelo como herramienta en los protocolos médicos.



Difusión
La posterior difusión del modelo depende de varios factores, como el impacto de los resultados sobre la comunidad médica y su expansión en los mercados biomédicos y biotecnológicos.



menos celulares y subcelulares, mientras que el resto genera estructuras a escalas mayores. A fin de describir todas las escalas, nuestro modelo emplea elementos discretos para las células endoteliales estrelladas y una formulación continua de campo de fase para el resto. Esta última ecuación también integra los procesos de proliferación responsables de la formación de nuevos vasos sanguíneos, mientras que una ecuación continua adicional gobierna la dinámica del factor angiogénico. Nuestro modelo predice la angiogénesis inducida por tumores y permite calcular la estructura de los capilares, pero sin pasar por alto lo que ocurre a pequeña escala. Hace poco, nuestro grupo ha aplicado este modelo al caso particular del cáncer colorrectal, usando la geometría específica del colon para predecir el momento en el que los vasos sanguíneos comienzan a llegar al tumor.

EL CAMINO A LA CLÍNICA

La complejidad de las ecuaciones de los modelos de cáncer es variable, lo que afecta a la precisión de los resultados y a su aplicabilidad clínica. Los modelos complejos pueden ser muy precisos, pero en ocasiones también requieren datos difíciles de medir o métodos de resolución que exigen técnicas de computación avanzada, lo cual limita enormemente su transferencia a la clínica. Por ello, en el diseño de modelos predictivos de cáncer, resulta de especial interés equilibrar el trinomio formado por complejidad, precisión y aplicabilidad clínica.

Existen modelos sencillos que integran una gran cantidad de información procedente de imágenes médicas y que han conseguido un éxito notable. El equipo de Kristin Swanson, de la Clínica Mayo, en Arizona, emplea un modelo consistente en una única ecuación de reacción-difusión para predecir el crecimiento del glioblastoma multiforme, un cáncer letal del cerebro. Esta ecuación incluye un término difusivo para la dispersión celular y uno reactivo para la proliferación neta. Con un término reactivo adicional para incorporar el efecto de la radiación, este modelo también se está usando para diseñar tratamientos radioterápicos óptimos. Thomas Yankeelov, de la Universidad de Texas en Austin, y su equipo utilizan la misma ecuación de dispersión y proliferación para predecir la evolución de los tumores de mama durante la quimioterapia neoadyuvante (previa a la cirugía). Con ello se persigue la detección precoz de pacientes que no responden a este tratamiento y que deben seguir otra estrategia clínica cuanto antes. Este modelo también incorpora ecuaciones de elasticidad lineal para incluir el efecto de empuje que induce el tumor al crecer sobre los tejidos circundantes, un fenómeno que puede limitar el propio crecimiento tumoral. En ambos modelos, los parámetros principales se extraen de resonancias magnéticas y de la historia clínica del paciente.

Todos los modelos anteriores se apoyan sobre un amplio trabajo de investigación en continuo desarrollo, lo que ha permitido calibrarlos con precisión y concebir las técnicas que dan soporte a la extracción de datos de imágenes médicas, a la resolución de los sistemas de ecuaciones y a la visualización de los resultados. La capacidad predictiva de estos modelos ha sido comprobada en estudios observacionales.

Sin embargo, la implementación de los modelos de cáncer en los protocolos médicos aún tendrá que esperar. Como paso previo, será necesario demostrar la superioridad de esta nueva técnica en un ensayo clínico; es decir, en un estudio intervencionista en el que algunos pacientes recibirán el protocolo clínico habitual y otros serán atendidos según el modelo matemático. Los ensayos clínicos proporcionan una prueba científica de gran calidad, por lo que constituyen un requisito indispensable para que las autoridades sanitarias y las sociedades médicas incluyan sus resultados en los protocolos de atención médica. La llegada a la clínica de las técnicas de modelización y simulación del cáncer también dependerá en gran medida de la difusión de los resultados y de su transferencia al mundo médico y al mercado biomédico y biotecnológico.

El camino a la clínica de los modelos matemáticos del cáncer se recorre a pasos cada vez mayores, pero sigue habiendo algunos obstáculos. Desde un punto de vista tecnológico, hay cuatro grandes frentes abiertos en los que se está investigando activamente: obtener la máxima información posible de la morfología y fisiología del tumor a partir de imágenes médicas; perfilar los modelos para incluir aquellos fenómenos que contribuyen significativamente al avance del cáncer; automatizar el proceso de simulación desde la extracción de datos de las imágenes a la visualización de los resultados, y desarrollar algoritmos para realizar simulaciones precisas en un tiempo clínicamente aceptable y minimizando el consumo de recursos informáticos.

La oncología matemática está abriendo una nueva dimensión en el estudio y el tratamiento del cáncer. Esta prometedora disciplina permite vertebrar nuestro conocimiento sobre las distintas patologías tumorales y nos brinda una nueva arma para combatir el cáncer de forma personalizada. Con ella podremos concentrar todos los recursos para combatir el cáncer y diseñar una estrategia ganadora, pues, como afirma Swanson, «cada paciente de cáncer merece su propia ecuación». IyC

PARA SABER MÁS

Toward patient-specific, biologically optimized radiation therapy plans for the treatment of glioblastoma. David Corwin et al. en *PLoS ONE*, vol. 8, n.º 11, e79115, noviembre de 2013.
Coupling of discrete random walks and continuous modeling for three-dimensional tumor-induced angiogenesis. Guillermo Vilanova, Ignasi Colominas y Héctor Gómez en *Computational Mechanics*, vol. 53, n.º 3, págs. 449-464, marzo de 2014.
Predicting the response of breast cancer to neoadjuvant therapy using a mechanically coupled reaction-diffusion model. Jared A. Weis et al. en *Cancer Research*, vol. 75, n.º 22, págs. 4697-4707, noviembre de 2015.
Tissue-scale, personalized modeling and simulation of prostate cancer growth. Guillermo Lorenzo et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 113, n.º 48, págs. E7663-E7671, noviembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Modelización en biología a través de escalas múltiples. Santiago Schnell, Ramón Grima y Philip K. Maini en *IyC*, mayo de 2007.
Una forma indirecta de domar el cáncer. Rakesh J. Jain en *IyC*, abril de 2014.
Un modelo determinista para frenar el crecimiento tumoral. Luis Bonilla, Manuel Carretero y Filippo Terragni en *IyC*, marzo de 2017.



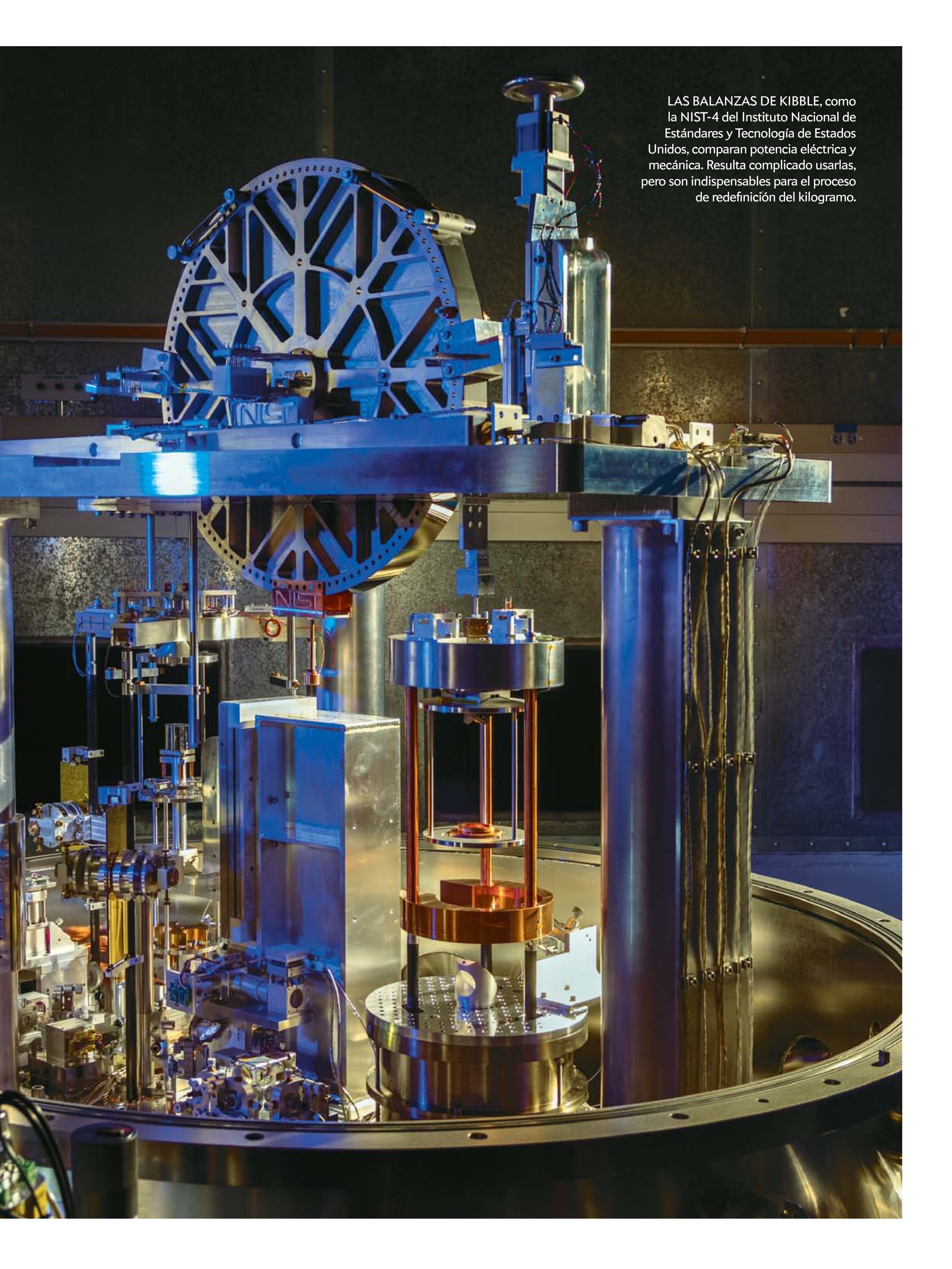
METROLOGÍA

SE ACERCA EL FINAL DEL PROLONGADO ESFUERZO EMPRENDIDO PARA LA SUSTITUCIÓN DEL OBJETO DEL SIGLO XIX, EN PROCESO DE DETERIORO, QUE DEFINE EL KILOGRAMO

Tim Folger



RICHARD BARNES (*fotografías*)



LAS BALANZAS DE KIBBLE, como la NIST-4 del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos, comparan potencia eléctrica y mecánica. Resulta complicado usarlas, pero son indispensables para el proceso de redefinición del kilogramo.



Tim Folger escribe para *National Geographic, Discover* y otras publicaciones. También es el coordinador de la colección *The best American science and nature writing*, una antología anual publicada por Houghton Mifflin Harcourt.

Mientras se acercaba al control de seguridad del Aeropuerto Internacional Dulles, en Washington, una tarde de abril de 2016, Jon Pratt se puso nervioso. En una bolsa de cámara fotográfica portaba cuatro cilindros sólidos de metal. Este tipo de objetos despertaría el recelo del precavido personal de la Administración de Seguridad en el Transporte, agencia perteneciente al Departamento de Seguridad Nacional de Estados Unidos. Cada cilindro pesaba exactamente un kilogramo. Uno de ellos, una reluciente aleación de platino e iridio del tamaño aproximado de la mitad de una lata de atún, valía al menos 40.000 dólares (el precio del platino actualmente ronda los 1000 dólares la onza troy, una unidad de masa usual en metales preciosos). Los otros tres estaban compuestos de acero inoxidable cuidadosamente procesado.

La misión de Pratt: entregarlos intactos y de forma segura a sus colegas en un barrio parisino.

Pratt portaba documentos del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST, por sus siglas en inglés) de Estados Unidos para que le franquearan el paso a través del control de seguridad. Los documentos explicaban que transportaba cuatro kilogramos oficiales estadounidenses, las masas de referencia que sirven como base para todas las medidas de peso en el país, e informaban que los kilogramos no debían tocarse o extraerse de sus recipientes de protección.

El esbelto Pratt, con un pasado de rockero punk, dirige la División de Medidas Cuánticas del NIST en Gaithesburg, Maryland. «El funcionario de seguridad del transporte me puso algún inconveniente», declara. «Pero entonces revisó toda la documentación, y aquello se convirtió en la novedad que le alegró la jornada.» Después de unos minutos, Pratt fue autorizado a pasar y abordó el vuelo para un viaje de siete horas hasta París. Lo que presentaba otro dilema: ¿qué hacer con su valioso equipaje de mano si necesitaba levantarse? ¿Debía aferrarse a la bolsa durante todo el vuelo, como le habían aconsejado algunos colegas? «He de admitir que la dejé debajo del asiento de enfrente mientras iba al baño», afirma. «Así que brevemente estuvo fuera de mi vista y alguien pudo haber llegado y restregado las manos por todos los kilogramos.»

Ese manoseo habría estropeado muchos meses de cuidadoso trabajo dedicado a medir los kilogramos con una precisión de unas pocas partes por mil millones. Pratt llevaba los cilindros a la Oficina Internacional de Pesas y Medidas (BIPM, por sus siglas en francés), en Sèvres, a las afueras de París en la margen izquierda del Sena. Unos meses después, los metrólogos de esta institución los compararon con cilindros metálicos idénticos de otros tres países, así como con una esfera de un kilogramo de silicio de alta pureza fabricada en el laboratorio metrológico nacional de Alemania. Era el último paso para un cambio histórico en la forma de medir la masa en el mundo.

Desde 1889, el mismo año en que se inauguró la torre Eiffel, el kilogramo se ha definido como la masa de un cilindro de platino e iridio guardado bajo tres campanas de vidrio, encerradas unas dentro de las otras en un sótano de la sede central de la BIPM. El Prototipo Internacional del Kilogramo, alias IPK, o «Gran K», es el kilogramo patrón del que se derivan todos los demás patrones nacionales de masa. El kilogramo representa una anomalía, ya que es la última unidad de medida vinculada aún a un objeto físico. Aunque no seguirá siendo así por mucho tiempo: a finales de 2018, el Gran K será sustituido y el kilogramo tendrá una nueva definición basada en la constante de Planck, una cantidad cuántica relacionada con la energía transportada por una única partícula de luz, o fotón.

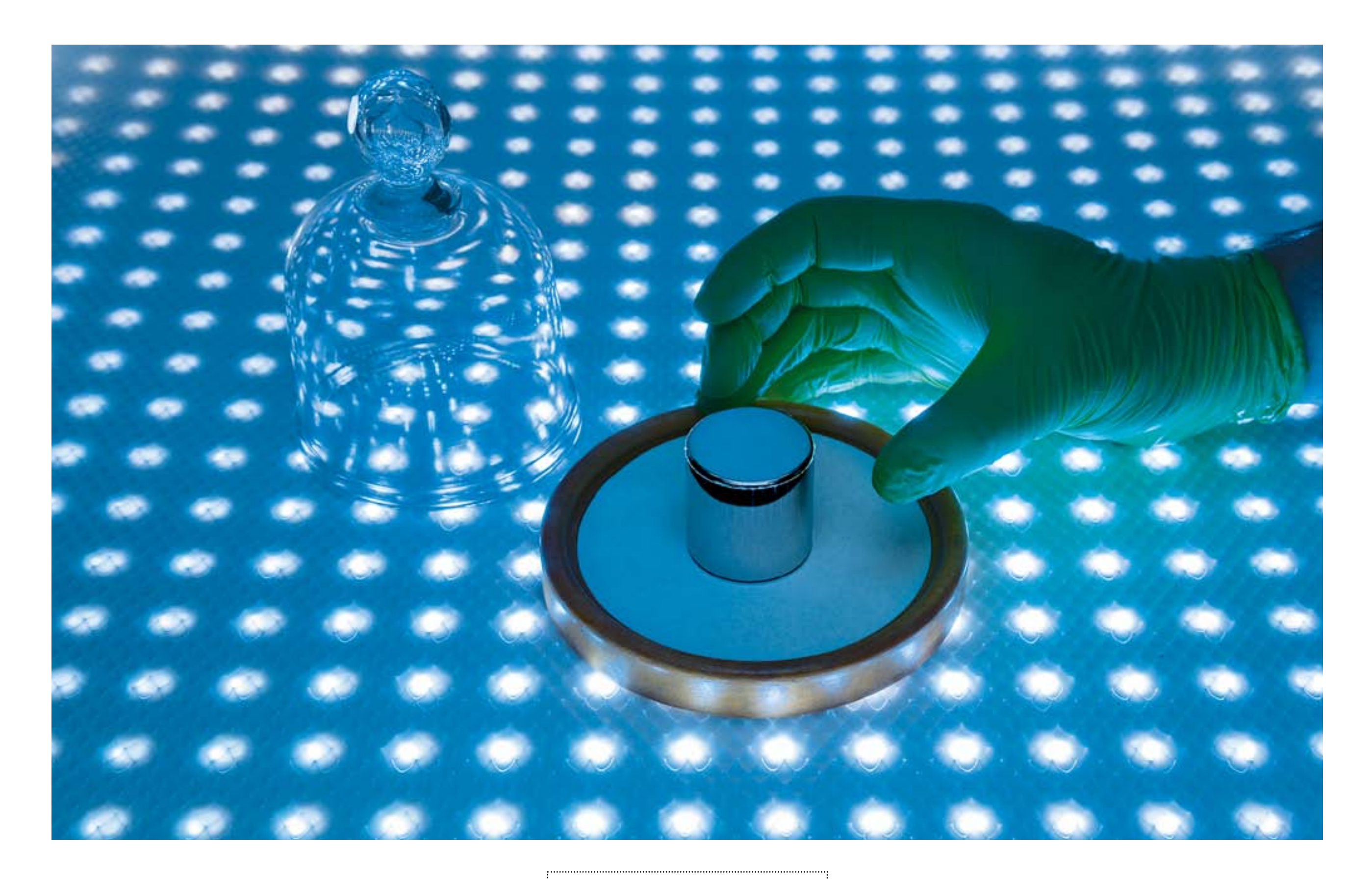
¿Por qué forzar la jubilación del Gran K? Durante años, los metrólogos han querido que la precisión y la fiabilidad del patrón internacional de masa estuviesen relacionadas con una constante fundamental del universo en lugar de con un bloque

EN SÍNTESIS

Desde 1889 se ha estado definiendo el kilogramo tomando como referencia un único cilindro de platino e iridio depositado en un sótano secreto de París. Es la última unidad de medida vinculada aún a un objeto físico.

Sin embargo, el patrón del kilogramo está perdiendo masa. Esa es en parte la razón por la cual la Conferencia General de Pesas y Medidas decidió en 2011 redefinir el kilogramo a partir de la constante de Planck, una cantidad fundamental de la teoría cuántica.

Este año, el proceso de redefinición, en el que participan los laboratorios metrológicos nacionales de cinco países y que implica algunas de las mediciones más complejas de la ciencia, entra en su fase final.



K20, el kilogramo nacional estadounidense, se calibra actualmente comparándolo con el Prototipo Internacional del Kilogramo guardado en París. Después de la redefinición, los metrólogos usarán la balanza NIST-4 en su lugar.

de metal de la era victoriana. Pero hay una razón más poderosa para el cambio: parece que el Gran K está perdiendo masa. Una vez cada aproximadamente 30 años, se saca de su sótano para limpiarlo y compararlo con seis copias oficiales, o «testigos», que se mantienen en el mismo recinto. Cuando se compararon los dos primeros testigos con el Gran K en 1889, ambos coincidieron con el original. Pero las medidas realizadas poco después de la Segunda Guerra Mundial y, de nuevo, en 1992 mostraron que las copias pesaban ligeramente más que el Gran K. Parece improbable que la masa de todas las copias aumentase de algún modo mientras el Gran K permanecía intacto. Hay, por supuesto, una explicación más probable. «Podríamos suponer», afirma Michael Stock, director de la BIPM, «que el Prototipo Internacional del Kilogramo pierde algo de masa». Esa incertidumbre es una de las razones por las que la Conferencia General sobre Pesas y Medidas, el órgano de gobierno de la BIPM, decidió en 2011 establecer un nuevo patrón de masa.

Nadie sabe por qué el Gran K podría estar adelgazando. Es demasiado valioso para someterlo a pruebas que proporcionen una respuesta. El misterio plantea serios problemas. El avance de la tecnología en futuras décadas hará que las mediciones precisas de masa a escala molecular e inferior se conviertan en rutina para una amplia variedad de industrias. «Queremos tener formas de medir masas de microgramos con al menos una resolución de tres dígitos», apunta Pratt. «Y con un kilogramo que es un objeto, la situación se torna realmente incierta a pequeña escalas.»

Las deficiencias del Gran K no se limitan a las medidas de masa. A la postre, las unidades de fuerza y energía también se derivan de él. «En la actualidad estamos en un punto donde veríamos cambiar valores de constantes fundamentales debido a un cambio en el IPK», declara Stock. «Eso no tiene sentido.»

EL NUEVO PATRÓN

De las siete unidades básicas del sistema métrico, el kilogramo es por ahora la última sometida a revisión, pero después vendrán otras. Además del kilogramo, el Sistema Internacional de Unidades, o SI, está compuesto por el metro, el amperio (para la corriente eléctrica), el segundo, la candela (una medida de la luminosidad intrínseca de una fuente de luz), el mol (que permite relacionar la masa de una cantidad de sustancia con el número de átomos que contiene) y el kelvin (para la temperatura).

Dos de las unidades del SI se redefinieron hace décadas. En 1983, el metro, antiguamente determinado por la distancia comprendida entre dos líneas grabadas en una barra de platino e iridio guardada en el mismo sótano que el Gran K, se convirtió en la distancia que recorre la luz en 1/299.792.458 de segundo. Con la aparición de mejores relojes atómicos en los años sesenta del siglo xx, el segundo, que se había definido como una fracción de un día, se actualizó en términos de una frecuencia específica de la radiación de microondas emitida por un átomo de cesio. El mol, el kelvin y el amperio también tienen todos prevista una actualización para 2018.

El estado actual del amperio es especialmente peculiar. Su definición oficial, parte de la cual hace referencia a dos hilos sin masa, unidimensionales e infinitamente largos, es tan abstracta que no puede reproducirse con exactitud en un laboratorio. Eso cambiará en 2018, cuando el amperio se redefina en términos de

Cambio de las definiciones

El Sistema Internacional de Unidades (SI), anteriormente conocido como sistema métrico, se fundamenta en siete unidades básicas (hay otras 22 que se definen a partir de ellas). Está previsto que en 2018 el Comité Internacional de Pesas y Medidas redefina la mayoría de las unidades básicas, lo que supondrá la mayor revisión del SI desde 1960. El cambio vinculará esas siete unidades a constantes de la naturaleza. El metro, el segundo y la candela permanecerán prácticamente iguales, pero las otras cuatro se redefinirán desde un punto de vista fundamental.

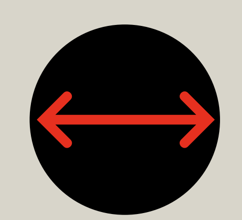
Actualmente definidas en términos de constantes físicas

Unidad: **Metro**
Abreviatura: **m**
Mide: **Longitud**

Definición actual (establecida en 1983):
«La distancia que recorre la luz en el vacío en 1/299.792.458 de segundo.»

Dato histórico:
Cuando la Academia de Ciencias francesa propuso el sistema métrico en 1791, definió el metro como la diezmillonésima parte de un cuadrante terrestre. A su vez, este se definió como un meridiano que va del Polo Norte al ecuador pasando —cómo no— por París.

Unidad: **Segundo**
Abreviatura: **s**
Mide: **Tiempo**



Definición actual (establecida en 1967):
«La duración de 9.192.631.770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133.»

Dato histórico:
La definición original es muy conocida; un segundo era 1/86.400 del «día solar medio», el tiempo que tarda la Tierra en completar una rotación tomando como referencia la posición del Sol. El comité dio al segundo su actual definición en 1967.

Unidad: **Candela**
Abreviatura: **cd**
Mide: **Luminosidad**

Definición actual (establecida en 1979):
«La intensidad luminosa en una determinada dirección de una fuente que emite radiación monocromática de una frecuencia de 540 × 10^{12} hercios y que posee una intensidad radiante en esa dirección de 1/683 vatios por estereorradián», la unidad del SI para el ángulo sólido.

Dato histórico:
Estados Unidos, Francia y Reino Unido definieron la candela con referencia a la luminosidad de una lámpara de filamento de carbono. En 1933, una definición más exacta se basó en la radiación del cuerpo negro. Se adoptó en 1948 y luego se sustituyó por la actual.

la carga de un electrón. Eso ha sido posible gracias al desarrollo de dispositivos nanotecnológicos capaces de contar partículas cargadas individuales que se mueven a través de un circuito.

«Las próximas redefiniciones que se consideren podrían incluir una candela basada en la mecánica cuántica y, quizás, una definición óptica del segundo en lugar de la actual, basada en las microondas», afirma Alan Steele, el máximo responsable metrológico de Canadá. «Pero para ello aún habrán de pasar 15 años o quizá más.»

La redefinición del kilogramo es el eje central de un esfuerzo en la creación de un sistema de medidas verdaderamente universal, que no esté ligado a convenciones terrenales y localistas. En principio, las nuevas unidades tendrían sentido para seres inteligentes en cualquier parte del universo. Para los metrólogos se trata de una época apasionante. «Es algo que sucede una vez en la vida», asegura Steele. «La última vez que intentamos algo tan fundamental fue cuando se redefinió el metro. Debo decir que este es el momento ideal para ser un máximo responsable en metrología. No es como la paz mundial o algo similar, pero sí es bastante emocionante.»

EL SÓTANO

El Gran K no fue el primer kilogramo oficial. Tiene un predecesor, realizado durante la Revolución francesa, cuando nació el sistema métrico. Antes de la revolución, las costumbres locales determinaban casi todas las pesas y longitudes de Francia. Los patrones variaban de una ciudad a otra, lastrando al país con más de 700 unidades de medida. Una *toise,* o toesa, era el equivalente de una braza inglesa, o *fathom*: la distancia abarcada por los brazos extendidos de un hombre. Pero una toesa parisiense (que equivalía a 72 *pouces*, o pulgadas) podía no coincidir con la utilizada en Marsella. Los *savants*, como llamaban los franceses a sus científicos, buscaron acabar con el caos creando un nuevo sistema «para todos los tiempos, para todos los pueblos», lema inmortalizado en una lápida contemporánea.

«La idea de 1791 era que los patrones debían basarse en fenómenos naturales e invariables», explica Richard Davis, director jubilado de la división de masa de la BIPM, que es la responsable del mantenimiento del Gran K. «Aún procedemos de ese modo», afirma. La diferencia es que los metrólogos recurren hoy a constantes naturales que son realmente invariantes.

Estamos en el despacho de Stock en el Pabellón de Breteuil, un elegante edificio del siglo XVII en lo alto de una frondosa colina con vistas al Sena del Parque de Saint-Cloud, que fue coto real de caza en tiempos de los reyes franceses. Aquí aún se cuida con esmero la rosaleda de María Antonieta. Es el cuartel general de la BIPM desde la Convención del Metro de 1875, un tratado que firmaron 17 naciones.

«¿Se fijó en la isla que había a la izquierda mientras cruzaba el puente hacia Sèvres esta mañana?», me pregunta Davis. Me cuenta que había albergado una fábrica de Renault donde se construían tanques para el ejército alemán en la Segunda Guerra Mundial. Fue un objetivo frecuente de los bombarderos estadounidenses. Después de que un bombardeo sacudiese el pabellón de Breteuil, el Gran K fue colocado en un contenedor resistente a las sacudidas. Los testigos fueron evacuados y trasladados a una

NIGEL HOLMES (*ilustraciones*)

Pendientes de redefinición

Unidad: **Kilogramo**
Abreviatura: **kg**
Mide: **Masa**

Definición actual (establecida en 1889):
En la actualidad aún se define el kilogramo con referencia al «Gran K», un cilindro de platino e iridio oculto en un sótano de París.

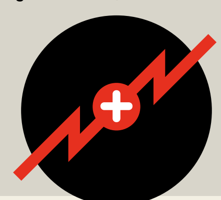


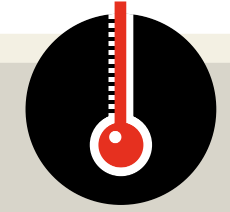
Redefinición propuesta:
Si se cumplen los plazos previstos, en 2018 el kilogramo se vinculará a la constante de Planck, una cantidad fija de la teoría cuántica que especifica la energía transportada por una única partícula de luz, o fotón.

Unidad: **Amperio**
Abreviatura: **A**
Mide: **Corriente eléctrica**

Definición actual (establecida en 1946):
La definición actual del amperio, que entre otras cosas hace referencia a «dos conductores rectos paralelos de longitud infinita, con sección circular transversal despreciable y separados un metro en vacío», es imposible de reproducir con exactitud en el laboratorio.

Redefinición propuesta:
El amperio se simplificaría fijando el valor numérico para la carga transportada por un protón (la constante fundamental conocida como carga elemental).





Unidad: **Kelvin**
Abreviatura: **K**
Mide: **Temperatura**

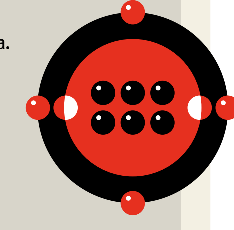
Definición actual (establecida en 1967):
El equivalente a «1/273,16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua», la combinación de temperatura y presión a la cual pueden coexistir el hielo, el vapor de agua y el agua líquida.

Redefinición propuesta:
Basar el kelvin en un valor fijo para la constante de Boltzmann, que relaciona la energía cinética media de las moléculas de un gas con su temperatura absoluta, mejoraría la precisión de las mediciones de temperaturas extremas.

Unidad: **Mol**
Abreviatura: **mol**
Mide: **Cantidad de materia**

Definición actual (establecida en 1971):
«La cantidad de sustancia de un sistema que contiene tantas entidades elementales como átomos hay en 0,012 kilogramos de carbono.»

Redefinición propuesta:
Se rompería el vínculo entre el mol y el kilogramo y la unidad se definiría fijando el valor numérico de la constante de Avogadro, la cual indica el número de moléculas, átomos u otras entidades discretas de materia contenidas en un mol de sustancia.



caja fuerte subterránea en el Banco de Francia, donde permanecieron durante la mayor parte de la guerra. La Convención del Metro, en cambio, especificaba que el Gran K siempre debía permanecer en la BIPM.

Cuando se extrajo el Gran K de su sótano después de la guerra, en 1946, para su limpieza y comparación con las seis copias, se descubrió que era 30 microgramos más ligero que los testigos. Cuando, 45 años después, se procedió a una nueva limpieza, la diferencia había aumentado hasta los 50 microgramos, el peso del ala de una mosca.

«Cincuenta microgramos en un siglo», dice Stock mientras contemplamos una gráfica de los cambios en el ordenador de su despacho. «Ya ve que es muy poco.» El experto sostiene que por ahora la discrepancia no presenta ninguna dificultad práctica. «Pero, si continuásemos en esta línea, tendríamos problemas en el futuro.»

En el ámbito de la nanotecnología, 50 microgramos es un número enorme. Además, la incertidumbre en la masa del kilogramo repercutiría en una larga cadena de unidades fundamentales: la unidad métrica de fuerza, el newton, se define en términos del kilogramo; a su vez, el newton define el julio, una unidad de energía; el julio define el vatio, y así sucesivamente. En definitiva, una pequeña interrogante contaminaría casi todas las medidas del mundo físico.

La limpieza del Gran K y su comparación con las masas de prueba no es una tarea rutinaria, especialmente porque solo se ha hecho cuatro veces desde 1889. Primero se debe extraer del sótano donde se encuentra, lo que requiere la presencia de tres personas para abrir tres cerraduras dispuestas verticalmente. En el sótano se encuentra una gran caja fuerte con cerradura por combinación en la que se guarda el Gran K, que descansa bajo tres campanas de vidrio, una dentro de otra. Solo tres personas en el mundo tienen las llaves del sótano: el director de la BIPM, el director de los Archivos Nacionales, en París, y el presidente del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM), que supervisa el trabajo de la BIPM. Como cada llave es diferente, para abrir el sótano deben estar presentes los tres.

«Soy la segunda persona de fuera de Europa que ha sido elegida para presidir el CIPM desde la Convención del Metro de 1875», señala Barry Inglis, ingeniero eléctrico australiano. «Les pregunté qué ocurriría si, de vuelta a mi casa, el avión se estrellaba al sobrevolar el océano Índico: "¿Cómo os las arreglaríais?". Pero estoy seguro de que hay cerrajeros que podrían abrir la vieja cerradura sin demasiados problemas.»

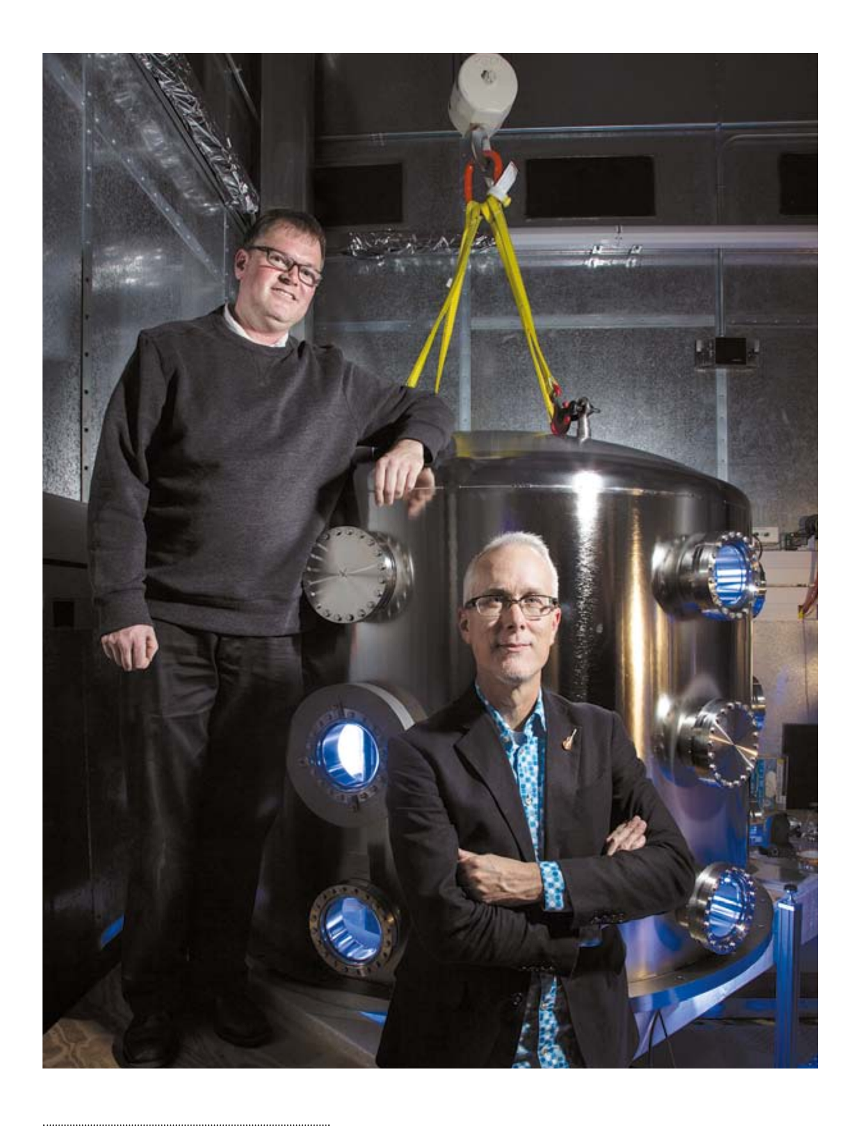
Entre el personal de la BIPM pocos han visto alguna vez el Gran K, y hay rumores de que sus fotografías oficiales son el retrato de una réplica. «Lo he visto una vez», comenta Susanne Picard, que trabaja en la BIPM desde 1987. Los tres poseedores de las llaves abren el sótano una vez al año para ver, sin tocar, el Gran K y asegurarse de que sigue allí.

Una vez dentro del santuario del Gran K, un técnico toma el reluciente cilindro con unas tenazas forradas de gamuza y lo transporta hasta un puesto de limpieza, donde se frota con un paño de gamuza empapado en alcohol y éter. Posteriormente se enjuaga con un chorro de agua doblemente destilada. Un soplido final de nitrógeno elimina cualquier residuo de gotas

de agua. El proceso completo dura aproximadamente una hora. La BIPM ha experimentado diferentes técnicas de limpieza con masas de prueba usando, por ejemplo, radiación ultravioleta. Pero esos métodos hacían que la aleación quedase demasiado limpia: «Parece que quitan más suciedad que con nuestro método», explica Stock. «Pero, después, la masa es inestable, pues queda tan limpia que la superficie se torna altamente reactiva.» Eso haría que el Gran K fuese menos fiable como patrón, así que la BIPM permanece fiel a su método de frotar con gamuza y enjuagar con agua.

Tras la limpieza, se llevan el Gran K y los testigos a una sala blanca y se colocan en un dispositivo llamado comparador de masas, un instrumento que cuesta 500.000 dólares y que puede medir diferencias de masa de hasta un microgramo. El comparador de masas y diez de los denominados kilogramos patrón de trabajo son las piezas angulares de la división de masa de la BIPM. Se utilizan para la mayoría de las calibraciones cotidianas. El Gran K y los testigos se sacan solo una vez cada pocas décadas para verificar los prototipos de kilogramo de los diferentes países.

Al finalizar la conversación con Davis y Stock, les pregunto si puedo ver el exterior del lugar donde reside el Gran K, pues ya sé que no tendré oportunidad de ver el majestuoso cilindro patrón. Estallando en carcajadas y meneando la cabeza, me responden: «No, no, no». «No es la primera vez que nos lo piden», dice Davis. «Está aquí, en este recinto, ¿verdad?», pregunto. «Sí», responde Davis, «hasta ahí es de conocimiento público».



LOS METRÓLOGOS Stephan Schlamminger y Jon Pratt posan frente a la balanza de Kibble NIST-4, que se ve aquí con la campana de vacío de 450 kilogramos colocada.

UNA MEDICIÓN DIFÍCIL

Dentro de poco, el Gran K será una curiosidad histórica y la nueva definición internacional de masa se basará en la constante de Planck. Esta constante presenta unidades de energía y tiempo, y puede expresarse en términos de una masa dándole vueltas a la ecuación $E = mc^2$. Tiene un origen teórico, al igual que G, la constante de la gravitación universal, pero su valor numérico solo puede determinarse experimentalmente. Y las mediciones de las constantes de la naturaleza van mejorando conforme se dispone de mejores instrumentos.

Para realizar la transición al nuevo patrón cuántico, la BIPM ha concebido una estrategia bipartita. Primero, los laboratorios metrológicos de cinco países fijarán un valor numérico para la constante de Planck, pesarán sus kilogramos nacionales en términos de ese valor y, a continuación, observarán el grado de coincidencia en sus medidas. Esta es la prueba que la BIPM realizó el verano pasado. Suponiendo que los resultados, previstos para este año, resulten satisfactorios, los participantes en el estudio invertirán el proceso y emplearán sus kilogramos nacionales en sus instalaciones locales para un ajuste fino de sus mediciones de la constante de Planck. El nuevo valor exacto de esta constante se usará entonces para redefinir permanentemente el kilogramo.

La mayor parte de estos trabajos implicará el uso de un instrumento sumamente complejo llamado balanza de Kibble, conocida hasta el año pasado como «balanza de vatios». Los metrólogos decidieron renombrarla después de la muerte en 2016 de su inventor, el físico británico Bryan Kibble. Los experimentos con esta balanza resultan tan complicados que la revista *Nature* los incluyó en 2012 entre las cinco tareas más difíciles de realizar en física, junto con la detección del bosón de Higgs o de las ondas gravitacionales.

Un día de mayo del año pasado, Stephan Schlamminger, del NIST, me condujo hasta un edificio blanco de dos pisos en el borde de las 235 boscosas hectáreas del instituto, donde se encuentra la más antigua de sus dos balanzas de Kibble. Actualmente está prácticamente en desuso, desde la conclusión de un modelo más moderno en 2014. «Es como *La casa de la pradera*», bromea Schlamminger mientras nos detenemos delante de la aislada edificación. Es aquí donde se realizaron la mayoría de las medidas de la constante de Planck por parte del NIST. El nuevo modelo funcionará de un modo muy parecido.

Cualquier semejanza con una granja se esfuma en cuanto entramos. El interior parece el escenario de una novela *steampunk*, una de esas obras de ciencia ficción con una anacrónica

mezcla de ambientación decimonónica y tecnología futurista. Las paredes están totalmente forradas de cobre hasta el techo del segundo piso. «¿Ve todos esos cacharros de latón?», dice Schlamminger. «No hay nada de hierro.» El cobre y el latón apantallan el instrumento contra los campos magnéticos externos, si bien los que se generan dentro del edificio tienen potencia suficiente para borrar tarjetas de crédito. En el centro de una sala del primer piso hay una alta columna de apoyo con un imán superconductor en su base, el cual se refrigera con helio líquido durante su funcionamiento.

El mecanismo efectivo de la balanza está en el segundo piso. Consta de una rueda de aluminio de medio metro de diámetro, montada verticalmente con unos platillos de balanza suspendidos por cables a cada lado. En la realización de las medidas, un platillo de la balanza sostiene una masa de un kilogramo, y tres barras de cuatro metros de longitud suspenden una bobina de alambre directamente bajo el platillo. El platillo al otro lado de la balanza sostiene un contrapeso y un motor eléctrico. Se

Los experimentos con la balanza de Kibble son tan complicados que la revista *Nature* los incluyó entre las cinco tareas más difíciles de realizar en física, junto con la detección del bosón de Higgs o de las ondas gravitacionales

requieren dos modos distintos de funcionamiento de la balanza para obtener todos los valores usados en las ecuaciones que relacionan la masa con la constante de Planck. En el «modo de pesada», la fuerza gravitacional ejercida hacia abajo sobre la masa de prueba está compensada exactamente por el campo magnético generado por una corriente que circula por la bobina suspendida bajo el platillo. En el «modo de velocidad», la masa de prueba se retira de su platillo y la bobina es levantada por el motor del platillo opuesto, a una velocidad constante y a través de un campo magnético creado por los imanes superconductores de la balanza, lo que induce un voltaje en la bobina mientras se mueve.

La corriente medida en el modo de pesada y el voltaje inducido en el modo de velocidad se introducen entonces en las ecuaciones de la teoría cuántica que relacionan corriente, voltaje y resistencia eléctrica con la constante de Planck. En resumen: se puede determinar la constante de Planck con la balanza de Kibble partiendo de una masa conocida de un kilogramo. Por tanto, si se dispone de un valor preciso de la constante de Planck, la balanza se puede usar para medir un kilogramo sin necesidad de compararlo con ninguna clase de objeto físico.

Para obtener resultados precisos, Schlamminger y sus colegas necesitan tener en cuenta las fluctuaciones locales relativas a la presión atmosférica y a la gravedad. También se deben incluir la precesión del eje terrestre y las mareas. «Si no se corrige el efecto de las mareas», explica Schlamminger, «hay un error aproximado de 100 partes en mil millones». A pesar de su complejidad, observa, el dispositivo le recuerda a un ingenio de otra época. Cuando su equipo medía la constante de Planck, las válvulas se tenían que abrir y cerrar en cuidadoso orden y había que comprobar constantemente la presión dentro de los tanques llenos de helio líquido. «Te sentías como si estuvieses conduciendo una máquina de vapor», añade Schlamminger, «¡a pesar de que se estaban efectuando experimentos que medían cantidades cuánticas!».

ADIÓS AL GRAN K

Lo que suceda a continuación dependerá de los resultados de las pruebas del año pasado. Las medidas del kilogramo realizadas por tres de los cinco laboratorios nacionales metrológicos participantes deben coincidir con un margen de 50 microgramos, la actual incertidumbre, correspondiente al peso de un ala de mosca, de la que adolece la masa del Gran K. Después de que se publiquen los resultados del estudio piloto comenzará el verdadero trabajo sobre la redefinición.

Si todo va bien, el kilogramo se redefinirá en términos de la constante de Planck. La BIPM ha establecido unos requisitos muy exigentes para la redefinición: no solo todas las medidas de la constante de Planck deben concordar con un margen de 50 partes por mil millones, sino que al menos una debe tener una incertidumbre inferior a 20 partes por mil millones, un valor que ya se ha superado en la medición canadiense. Para que la redefinición tenga lugar en 2018, todas las nuevas mediciones de la constante de Planck deberán ser aceptadas para su publicación antes del 1 de julio de 2017.

¿Y qué sucederá con el Gran K? Permanecerá en su sótano. Dada la complejidad de las balanzas de Kibble, es probable que no hayamos visto el último de los objetos que hagan de kilogramo patrón. En lugar de realizar regularmente laboriosas medidas con una balanza de Kibble, los laboratorios metrológicos del mundo usarán durante las próximas décadas una nueva generación de prototipos para el trabajo cotidiano. Estos ya están tomando forma en la BIPM, pero se calibrarán con balanzas de Kibble, y no con el Gran K.

¿Es este el final de la historia? ¿Tendremos entonces un kilogramo para todos los tiempos y para todos los pueblos? Stock se reserva la opinión.

«Uno de mis predecesores, un premio nóbel llamado Charles Edouard Guillaume, pensaba que el kilogramo actual valdría durante 10.000 años», apunta. «Por supuesto, fue un exceso de optimismo. No estoy seguro de si esta será la última redefinición, pero debería ser válida durante algún tiempo. Aunque quizá no para los próximos 10.000 años.»

PARA SABER MÁS

The measure of all things: The seven-year odyssey and hidden error that transformed the world. Ken Alder. Free Press, 2002.
Frontier experiments: Tough science. Nicola Jones en *Nature*, vol. 481, págs. 14-17, 5 de enero de 2012. **www.nature.com/news/frontier-experiments-tough-science-1.9723**
How to build your NIST D.I.Y. watt balance. Vídeo. National Institute of Standards and Technology, 26 de agosto de 2015. **www.youtube.com/watch?v=oST_krdqLPQ**
Página en Internet de Atlas Obscura sobre el último metro original guardado en París: **www.atlasobscura.com/places/the-last-original-standard-metre**

EN NUESTRO ARCHIVO

Un nuevo kilogramo. Ian Robinson en *IyC*, febrero de 2007.
Revisión del Sistema Internacional de Unidades. Robert Wynands y Ernst O. Göbel, en *IyC*, julio de 2010.

NEUROCIENCIA

LOS RAYOS CÓSMICOS PODRÍAN SER AÚN MÁS NOCIVOS DE LO SUPUESTO. ¿PODRÁ LA HUMANIDAD VIAJAR ALGÚN DÍA ENTRE LAS ESTRELLAS?

Charles L. Limoli

EL PELIGRO OCULTO EN EL ESPACIO PROFUN


DO



Charles L. Limoli es neurocientífico y radiobiólogo de la Escuela de Medicina de la Universidad de California en Irvine. Estudia los trastornos cognitivos producidos por varios tratamientos oncológicos, así como por la radiación espacial.



DESDE HACE MILENIOS, EL SER HUMANO HA CONTEMPLADO EL CIELO nocturno y ha soñado con alcanzar las estrellas. Ahora que hemos hollado la Luna y vivido a bordo de estaciones espaciales en órbita, parece inevitable que nos aventuremos más lejos, hasta Marte, el resto del sistema solar y allende. Muchas culturas comparten este sueño, que mantiene ocupadas a las agencias espaciales de todo el mundo.

Pero sabemos que el espacio es hostil. Cada vez que un astronauta abandona la Tierra se enfrenta a un frío helador, a la ausencia de atmósfera, a la microgravedad y a la radiación. Hasta ahora todos esos riesgos parecían superables en gran medida: meros problemas de ingeniería que aguardaban una resolución y peligros que los osados viajeros espaciales asumían por voluntad propia. Pero nuevas investigaciones, llevadas a cabo por mi equipo y otros grupos de científicos, han revelado que la radiación espacial podría ser más dañina de lo supuesto, en particular para el frágil pero fundamental cerebro humano. Si bien hace décadas que conocemos la naturaleza radiactiva del espacio, hasta fechas recientes no hemos recabado pruebas de la intensidad y la duración de los efectos que la radiación ejerce sobre dicho órgano.

Mediante la irradiación de ratones, mi equipo ha descubierto trastornos cognitivos patentes y duraderos que probablemente afecten también a la especie humana, un imprevisto que podría echar al traste las misiones espaciales. Los tripulantes de la Estación Espacial Internacional orbitan a una altura relativamente baja y quedan por ello resguardados de los peores efectos bajo el tenue abrigo que brindan los límites de la atmósfera, pero aún así ya corren el riesgo de sufrir daños cognitivos. El peligro para todo aquel que osara viajar a Marte o más allá sería mucho más grave.

Hoy por hoy, nuestra capacidad para mitigar esos peligros es limitada. El refuerzo del blindaje de la astronave podría neutralizar parte de la radiación, pero ningún material conocido es lo bastante liviano para ser práctico. Los fármacos que podrían proteger nuestro cuerpo contra los efectos de la radiación están en pañales. Si no damos con una solución, el sueño de viajar a través del sistema solar y traspasar sus confines podría quedar fuera de nuestro alcance.

PARTÍCULAS PENETRANTES

La radiación cósmica es perniciosa; invisible e imperceptible como es, llena, sin embargo, cada milímetro de lo que parece un espacio vacío y puede dañar gravemente los tejidos humanos. La más peligrosa para los astronautas son los rayos cósmicos galácticos (RCG): núcleos atómicos dotados de carga eléctrica que se mueven casi a la velocidad de la luz y que los astrónomos creen originarios de las supernovas surgidas de la muerte de algunas estrellas. Además de los RCG, que impregnan el cosmos como un campo uniforme, nuestro Sol también expulsa protones (átomos de hidrógeno ionizados) de múltiples energías. Conforman la mayor parte de la radiación espacial, pero, debido a su pequeña masa, causan un daño notablemente menor que las partículas más pesadas. Y, lo que es más importante: todas ellas poseen la energía suficiente para atravesar el casco de las astronaves y el cuerpo de los astronautas. El campo magnético que envuelve la Tierra desvía la mayoría de esas partículas cósmicas lejos de la superficie y protege a sus moradores, de ahí que el abandono de la magnetosfera conlleve inevitablemente la exposición a ellas, con las consecuencias negativas que acarrea su contacto con los tejidos humanos.

Los rayos cósmicos son tan problemáticos porque cuando las partículas atraviesan el cuerpo ceden parte de su energía a los átomos de los tejidos, que quedan ionizados; es decir, los impactos expulsan electrones de los átomos neutros y los convierten en iones. Esas partículas con carga eléctrica se mueven siguiendo su propia trayectoria y arrancan a su vez más electrones que generan nuevas trayectorias secundarias, lo que agrava el daño. Cuanto mayor es la masa de la partícula de radiación, mayor es su energía y más átomos ioniza.

La redistribución de esos electrones provoca la ruptura de los enlaces moleculares entre algunos átomos, lo que daña pro-

EN SÍNTESIS

Los viajes espaciales han sido siempre peligrosos, pero recientes investigaciones muestran que los rayos cósmicos resultan más dañinos para el cerebro de lo que creíamos.

Un grupo de científicos ha irradiado ratones con partículas dotadas de carga eléctrica para simular la radiación que los astronautas reciben en el espacio y ha descubierto deterioro en el comportamiento y daño neuronal.

Para que la humanidad tenga un futuro entre las estrellas, será preciso diseñar mejores escudos para las astronaves y trajes espaciales o fármacos que protejan el cerebro.

PÁGINAS ANTERIORES: CHRIS MALBON

teínas, lípidos, ácidos nucleicos y otras moléculas vitales de las células y los tejidos. Esa expulsión de electrones engendra radicales libres: átomos o moléculas que, desprovistos de parte de sus electrones, resultan sumamente reactivos, ávidos por rellenar sus orbitales atómicos vacíos a costa de los electrones de otros átomos o moléculas adyacentes. Así reaccionan con otras moléculas del cuerpo y las transforman en nuevos compuestos químicos que no cumplen su propósito original. Cuando se tropiezan con el ADN, por ejemplo, los radicales libres rompen su cadena principal de azúcar y fosfato o dañan sus bases nitrogenadas.

Los especialistas miden la exposición a la radiación en «dosis absorbida», la energía perdida por la radiación y retenida en el cuerpo (por unidad de masa corporal). La unidad del Sistema Internacional para la dosis absorbida es el gray (Gy), que equivale a un julio por kilogramo. La radiación también viene en diferentes «calidades», esto es, la densidad de la ionización que produce por unidad de dosis. Los tipos de radiación se clasifican por su transferencia lineal de energía (TLE), o la cantidad de energía perdida por distancia recorrida. Por ejemplo, una dosis de radiación con alta TLE es más peligrosa que la misma dosis de baja TLE porque deja a su paso más energía y causa la ionización de más átomos, por lo que la célula tiene mayores dificultades para reparar el daño y recuperarse. Puesto que muchos de los tipos de radiación de los RCG tienen TLE relativamente altas, este hecho tiene importantes consecuencias para los viajes interestelares, como comentaremos más adelante.

Las partículas de radiación más pesadas y energéticas pueden, en contraste con las de masa más pequeña, dejar tras de sí numerosos radicales libres y causar mayor destrucción en los tejidos por la ionización de los átomos. A escala molecular, hallamos pequeñas regiones de escasos nanómetros que acumulan una alta densidad de radicales libres, los cuales pueden generar multitud de puntos dañados en las moléculas fundamentales en un volumen relativamente pequeño. Así, las partículas con carga eléctrica y pesadas producen muchas más regiones de acumulación de daños que la radiación fotónica, como los rayos X y gamma. Es esta densidad de daño la culpable de que los rayos cósmicos sean más peligrosos que las radiaciones ionizantes existentes en la Tierra.

RECREAR EL ESPACIO SIDERAL EN LA TIERRA

A pesar de la ubicuidad de las partículas cargadas en el espacio, la reproducción de ese tipo de rayos en la Tierra con el fin de estudiar sus efectos entraña dificultades considerables. Uno de los pocos lugares donde es posible llevar a cabo experimentos que los simulen es el Laboratorio de Radiación Espacial de la NASA, una instalación que esta agencia y el Laboratorio Nacional de Brookhaven pusieron en marcha en 2003 en Long Island. Allí, grandes aceleradores de partículas imprimen a iones de diversa masa velocidades cercanas a las de los rayos cósmicos. Los experimentadores colocamos blancos (en nuestro caso, ratones) en medio de su trayectoria y medimos los efectos. Estas pruebas pueden mostrarnos cómo afectan a los tejidos vivos ciertos tipos de rayos cósmicos, en distintas dosis. Hace poco expusimos ratones de 6 meses a dosis bajas (de 0,05 a 0,30 Gy) de partículas cargadas (oxígeno y titanio, entre otras) y analizamos su comportamiento. Los roedores completaron una serie de tareas denominadas «reconocimiento de objetos novedosos» (RON) y «asociación de objeto con lugar» (AOL), con las que evaluamos el efecto de la radiación sobre su memoria y pensamiento. Primero los ratones exploraron una caja vacía de alrededor de un metro cuadrado. A continuación introdujimos en su interior unos ladrillos de construcción, patos de goma y otros juguetes y dejamos que merodearan un poco más. Acto seguido —al cabo de unos minutos, pero también de horas o hasta un día después— sustituimos esos objetos por juguetes nuevos (RON) o cambiamos su ubicación (AOL). Un roedor despierto y sano se sentirá atraído por la novedad y pasará más tiempo curioseando el nuevo juguete o lugar que los objetos que permanecen en las mismas condiciones, mientras que un ratón deficiente pasará

DESCUBRIMIENTOS CIENTÍFICOS

Cerebro espacial

Los rayos cósmicos podrían dañar el cerebro de los astronautas más de lo supuesto hasta ahora. Un grupo de científicos expuso ratones a un ataque de partículas cargadas que imitaban las que pululan por el espacio y evaluaron el comportamiento y el daño físico. El daño se reveló con técnicas de neuroimagen.

La radiación similar a la espacial dañó la corteza prefrontal medial, una región del cerebro del ratón vinculada con la memoria. En esta zona, las ramificaciones de las neuronas denominadas espinas dendríticas se redujeron en tamaño y número.

Las dendritas reciben señales químicas de otras neuronas. Ocho semanas después de la exposición a 30 centigrays de radiación, los ratones mostraron una reducción de un 20 a un 40 por ciento en el número de espinas dendríticas (*amarillo*), pequeñas ramificaciones del eje principal de la dendrita que facilitan el aprendizaje y la memoria.

FUENTE: «WHAT HAPPENS TO YOUR BRAIN ON THE WAY TO MARS», POR VIPAN K. PARIHAR ET AL., EN *SCIENCE ADVANCES*, VOL. 1, N.º 4, ART. E1400256; 1 DE MAYO DE 2015; EMILY COOPER (*ilustración*)

menos tiempo husmeando. Tales pruebas han demostrado ser indicadores fiables de varios tipos de funciones hipocampales (memoria y aprendizaje) y corticales (pensamiento). Medimos el comportamiento del animal con el llamado índice de discriminación: el tiempo dedicado al nuevo objeto o lugar dividido por el tiempo total invertido en explorar las situaciones de todo tipo, tanto nuevas como conocidas.

Nuestros experimentos con las tareas RON y AOL mostraron que la radiación disminuye notablemente el índice de discriminación del ratón. Al cabo de seis semanas, el desempeño de los roedores expuestos a esas dosis (de 5 a 30 cGy, o centigrays) había decaído en un 90 por ciento, cambios que resultaron sorprendentemente uniformes con independencia de la dosis. Más aún, pruebas muy recientes indican que tales efectos perduran 12, 24 o incluso 52 semanas después de la exposición. Estos resultados apuntan a que la exposición a niveles similares de rayos cósmicos podría resultar problemática para los astronautas envueltos en la toma de decisiones críticas, la resolución de problemas o en acciones vitales para su misión.

Los científicos están desarrollando fármacos y complementos nutricionales que podrían mitigar los peores efectos de la radiación en el cerebro. Sin embargo, todos estos esfuerzos están en sus inicios y ninguno promete ser una panacea

UN ÁRBOL NEURONAL DESMOCHADO

Junto con mis colaboradores, complementamos esas pruebas de comportamiento con imágenes de cortes del cerebro de los ratones irradiados. El paso de las partículas energéticas cargadas a través de ese órgano tiene el potencial de cambiar profundamente los circuitos neuronales. Queríamos observar cualquier daño físico que pudiera guardar relación con los cambios de comportamiento detectados. Con ese propósito, nos servimos de ratones genomodificados cuyo cerebro luciría brillantes neuronas fluorescentes visualizables con microscopía de alta resolución. Captamos así una serie de imágenes fluorescentes a varias profundidades en áreas cerebrales concretas, que superpusimos para crear una representación tridimensional del cerebro. Las imágenes revelaron cambios significativos en las dendritas de las neuronas, las ramificaciones dactiliformes que sobresalen de su soma y que reciben señales químicas de otras neuronas emitidas a través de otras proyecciones similares llamadas axones. Estudios anteriores de nuestro laboratorio habían constatado que los rayos X y gamma poco ionizantes (baja TLE) causaban reducciones sustanciales de la longitud, el área y la ramificación de las dendritas durante 10 y 30 días. En conjunto, calificamos estos cambios como una reducción de la complejidad dendrítica, un parámetro fundamental comparable con las ramas de un árbol. Y nuestro último estudio, publicado en 2015 en *Science Advances*, constató asimismo que dosis muy bajas de partículas cargadas pueden generar pérdidas significativas y persistentes de la complejidad dendrítica.

Además, dichos cambios afectaron a la corteza prefrontal medial, una región del cerebro que se sabe involucrada en la memoria y que, a la luz de nuestras pruebas de comportamiento, sospechamos que podría estar dañada. Esto no quiere decir que otras zonas del cerebro salgan indemnes o que otros circuitos neuronales no estén afectados, pero nuestros hallazgos demuestran las ventajas de combinar los estudios de comportamiento con las imágenes cerebrales para vincular el declive cognitivo con los cambios estructurales en áreas concretas del cerebro. A la vista de esas primeras imágenes decidimos efectuar un análisis con mayor resolución en busca de pruebas de otras alteraciones en estructuras tales como las espinas dendríticas, pequeñas proyecciones (menos de una micra, una fracción del ancho de un cabello humano) que nacen del eje principal de la dendrita y que facilitan el aprendizaje y la memoria. Si las dendritas son las ramas del árbol, las espinas dendríticas son las hojas. Estas albergan la maquinaria sináptica que permite recibir las señales neuronales y lucen distintas formas según la tarea desempeñada. Tanto nuestro trabajo anterior con rayos X y protones como nuestro último trabajo con partículas cargadas han revelado la acusada sensibilidad de las espinas dendríticas a la radiación. Hallamos que su densidad, el número de espinas por unidad de longitud, disminuía notablemente tanto con la exposición breve (10 días) como prolongada (6 semanas). Estos efectos, graves y persistentes, confirman que las partículas cargadas provocan cambios estructurales de consideración que comprometen la capacidad de las neuronas para mediar la neurotransmisión, puesto que reducen el número de sinapsis en el cerebro del ratón.

Para corroborar que los cambios en el comportamiento de los ratones tenían su origen en las alteraciones halladas en las neuronas, representamos el comportamiento de cada roedor en función de la densidad de las espinas dendríticas de su cerebro. Los datos revelaron que el descenso de la densidad dendrítica corría en paralelo con el deterioro de la capacidad cognitiva. Los ejemplares que exhibían la actitud más pasiva, con escaso interés por las novedades, mostraban las densidades más bajas de espinas, lo que sugiere por lo menos cierta relación entre la alteración cognitiva y la reducción en el número de espinas. Estos datos aportan la primera prueba que relaciona el daño estructural con los resultados adversos de comportamiento observados en los animales expuestos a los rayos cósmicos.

Tales resultados contribuyen a confirmar lo que la NASA ha sospechado durante años: la radiación puede minar el rendimiento cognitivo de los astronautas. Hasta ahora, ese temor se fundamentaba básicamente en publicaciones clínicas que documentaban un abanico de efectos cognitivos en los pacientes con tumores cerebrales que han sobrevivido a la radioterapia craneal. Sin embargo, en el pasado, los científicos han dudado si extrapolar esos resultados a los astronautas, por ser poblaciones expuestas a distintos tipos y dosis de radiación. En medicina, la dosis diaria típica (2 Gy) excedería la mayor parte de las dosis de radiación estimadas para el viaje de ida y vuelta y la estancia prolongada en Marte. Las dosis interplanetarias rondan los

0,48 mGy (miligrays) diarios durante el año de viaje y la mitad de ese valor durante la estancia prevista de un año o más en el planeta rojo, puesto que la masa marciana absorbe la radiación que incide por abajo. Si bien las dosis totales usadas en medicina son muy superiores a las que imperan en el espacio, los rayos X y gamma con que se irradian los tumores son poco ionizantes (baja TLE), mientras que las partículas cargadas que nos preocupan en el espacio son altamente ionizantes (alta TLE). Por esta razón, no ha sido posible hacer comparaciones fiables entre los efectos observados en los pacientes con cáncer y los que esperamos en los astronautas.

Nuestro trabajo aporta más pruebas que sustentan la idea de que la radiación espacial resulta nociva para el cerebro de los astronautas, pero persisten ciertas reservas. Si bien en nuestros estudios se aplicaron dosis de radiación similares a las que experimentarían los viajeros siderales, no pudimos suministrarlas al mismo ritmo con que las recibirían los astronautas. Estos quedarían expuestos durante meses o años, lo que pone de relieve la naturaleza prolongada de la exposición a los rayos cósmicos. Puesto que solo tuvimos acceso a las instalaciones del acelerador durante un plazo limitado, tuvimos que suministrar la misma dosis en cuestión de segundos. Esta gran diferencia en el ritmo de administración puede suscitar dudas sobre los resultados, pues se podría suponer que la lentitud de la dosis concedería tiempo para que las células se rehicieran. Pero, de hecho, es probable que la diferencia en el ritmo de administración no sea importante, puesto que la dosis total es baja (en otras palabras, las partículas atraviesan infrecuentemente la materia), las partículas espaciales más preocupantes son las dotadas de una alta TLE (causantes de graves daños celulares difíciles de reparar, con independencia de la velocidad a la que incidan) y, finalmente, la mayor parte del cerebro no puede engendrar neuronas nuevas con facilidad, lo que dificulta aún más la recuperación. Y si bien nuestros descubrimientos conciernen a los roedores, no hay motivos para pensar que las neuronas humanas responderían a los rayos cósmicos de modo muy distinto.

¿NUESTRO FUTURO EN EL ESPACIO?

Afrontamos obstáculos desalentadores en nuestro deseo de mandar humanos hacia otras partes del sistema solar. Los astronautas necesitarán naves más grandes y más potentes que las actuales para alcanzar Marte y otros astros de nuestro sistema y, llegados a su destino, precisarán espacios habitables y la capacidad de usar recursos del lugar para obtener agua y combustible para la astronave. A esta lista de dificultades debemos añadir ahora la necesidad de proteger a los colonos espaciales de la radiación, extremo que podría ser el más difícil de resolver.

El primer modo de abordar el problema es a través de escudos que neutralicen la radiación antes de que cause ningún daño, ya sea instalados en la astronave y en los espacios habitables o incorporados a los trajes espaciales o demás indumentaria. Por el momento, la única barrera eficaz exige el uso de materiales sumamente densos y pesados, como el plomo. Funcionan, pero no son nada prácticos para la exploración espacial, pues su abultado peso exigiría una cantidad prohibitiva de combustible para el despegue. Los esfuerzos actuales se orientan hacia el diseño de materiales de protección y controles técnicos avanzados que refuercen el blindaje externo en zonas concretas de la nave. La tripulación se retiraría a esas zonas especialmente protegidas durante los momentos de mayor actividad solar y llevaría cascos y trajes espaciales diseñados para maximizar la protección antirradiación en sus desplazamientos extravehiculares o incluso durante el sueño diario. Pero, ante todo, debería ser un material radicalmente mejor para que fuera realmente eficaz.

También se están desarrollando fármacos y complementos nutricionales que los astronautas tomarían con regularidad o tras una exposición aguda a la radiación generada por una tormenta solar importante, por ejemplo, con el fin de mitigar sus peores efectos sobre el cerebro. Preparados a base de antioxidantes, parecen limitar los daños en los ratones expuestos a la radiación similar a la espacial. También se han conseguido avances en el diseño de sustancias que refuerzan los circuitos cerebrales para mantener su función después del daño. Sin embargo, tales esfuerzos están en sus inicios y ninguno promete ser una panacea. Todo lo que podemos esperar es paliar el daño, no acabar con él. Debemos seguir investigando los efectos de los rayos cósmicos en el cerebro, así como en el resto del cuerpo, a fin de dilucidar los riesgos para la salud a corto y a largo plazo que acarrea la exposición prolongada.

Nuestros descubrimientos delatan un problema de los viajes siderales que quizás haya quedado en un segundo plano ante otros peligros. Por ejemplo, el riesgo de cáncer provocado por la radiación se conoce mejor, pero podría ser de hecho menos importante dado el largo tiempo que precisan los tumores radiógenos para surgir. Hemos mostrado, sin embargo, que incluso pequeñas cantidades de rayos cósmicos causan daños neuronales y deficiencias cognitivas en los ratones y es harto probable que también sea así en los humanos.

La persistencia de los cambios provocados por la radiación es otro motivo de preocupación. Hasta la fecha no hay indicios de que el deterioro de la complejidad dendrítica y de la densidad de las espinas causado por la exposición a los rayos cósmicos sea reversible, y si bien es prematuro calificar esos cambios como permanentes, no hay prueba alguna de que las neuronas puedan recuperarse de ese tipo de lesión. Así pues, hasta que descubramos medios específicos que promuevan y aceleren la regeneración del tejido cerebral irradiado, todo lo que podemos hacer es proteger nuestros circuitos neuronales.

La exposición a los rayos cósmicos supondrá uno de los mayores obstáculos en el viaje a Marte y será aún más decisiva en las misiones al espacio profundo, necesarias para explorar los mundos más remotos. Quizás alguien considere que estos descubrimientos son controvertidos, pero resulta difícil ignorar los datos y las importantes implicaciones que pueden tener para el programa espacial. ¿Significa esto que estamos condenados a permanecer para siempre en la Tierra? Quizá no. Estos resultados tal vez representen simplemente otro nuevo obstáculo que la humanidad habrá de vencer antes de embarcarse en el que podría ser su mayor reto y tal vez su mayor logro.

PARA SABER MÁS

Space radiation risks to the central nervous system. Francis A. Cucinotta et al. en *Life Sciences in Space Research*, vol. 2, págs. 54-69, julio de 2014.
What happens to your brain on the way to Mars. Vipan K. Parihar et al. en *Science Advances*, vol. 1, n.º 4, art. e1400256, mayo de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Radiaciones ionizantes de bajo nivel y sus efectos biológicos. Arthur C. Upton en *IyC*, abril de 1982.
Blindajes espaciales. Eugene N. Parker en *IyC*, mayo de 2006.
La humanidad en el espacio. Cameron M. Smith en *IyC*, marzo de 2013.

LA PALABRA *silbada*



Mucho antes de que existieran los teléfonos móviles o incluso el código Morse, algunas poblaciones rurales silbaban para comunicarse a larga distancia. El fenómeno aún fascina a los lingüistas

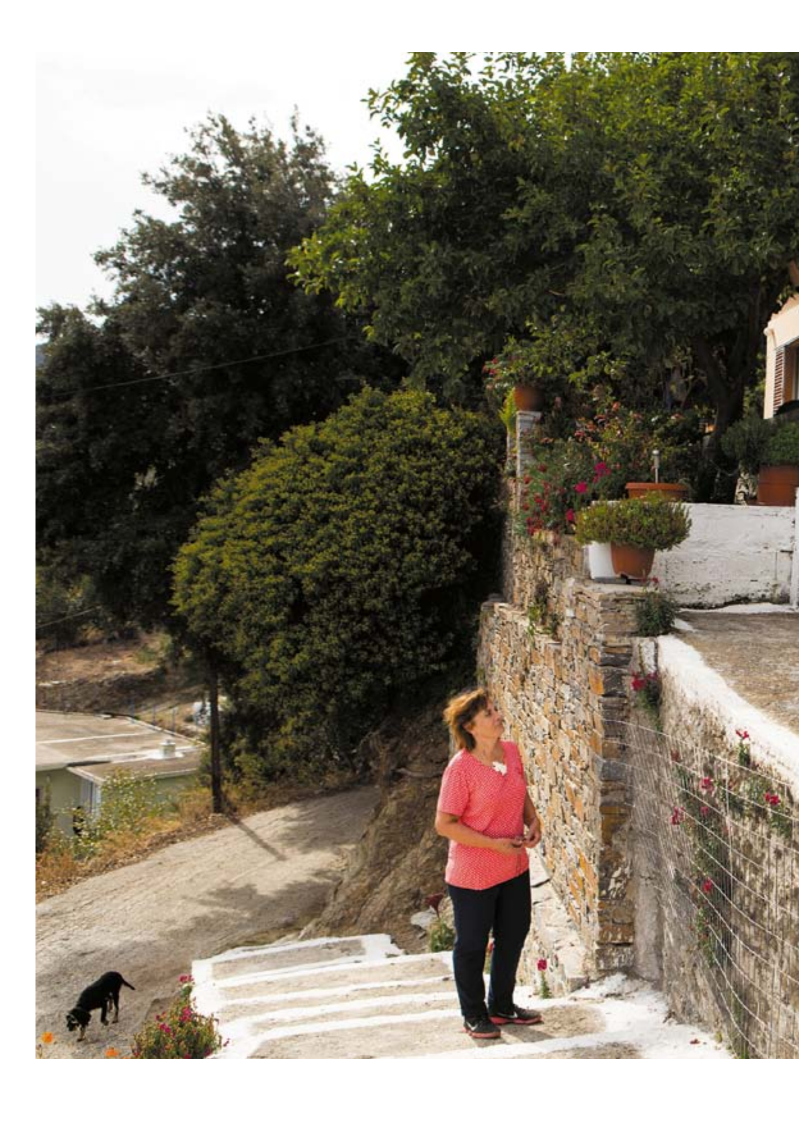
Julien Meyer



COMUNICACIÓN INALÁMBRICA: En el pueblo griego de Antia, Kiriakoula Yiannakari silba un mensaje a sus vecinos.

Julien Meyer es lingüista y experto en bioacústica del CNRS francés y miembro del GIPSA-lab, en Grenoble. Su investigación se centra en la fonética, la lingüística, los aspectos cognitivos del lenguaje y las comunidades rurales. Dirige el proyecto Icon-Eco-Speech y es cofundador de la Asociación Mundial para la Investigación del Silbo, que documenta y salvaguarda las lenguas silbadas.





Una mañana de primavera, Panagiotis Kefalas se encontraba en la taberna que regentaba en la pequeña localidad griega de Antia cuando recibió una llamada de Kyria Koula. Kefalas planeaba desayunar en casa de su amiga, situada a doscientos metros. La llamada no se anunció con la melodía de un teléfono móvil, sino que llegó directamente al oído de Kefalas en forma de agudos silbidos:

«Bienvenida, ¿qué quieres?», trinó Koula.
Kefalas frunció los labios y silbó:
«Por favor, me gustaría comer».
«Muy bien», contestó Koula.
«Me apetecen huevos revueltos», sugirió Kefalas.

Cualquier visitante se habría quedado perplejo: el comienzo de la primera frase, «bienvenida» (*kalós irthate*, en griego romanizado), suena como un silbido lascivo —*fiu, fiuuu*—, con la diferencia de que el tono de la segunda sílaba arrastrada sube con rapidez.

Según algunas fuentes, la tradición del silbo, hoy en peligro de extinción y preservada por solo unas docenas de residentes de Antia, fue durante siglos el medio preferido por los pastores de ovejas y cabras para comunicarse de un cerro a otro. A fin de cuentas, los silbidos llegan mucho más lejos que los gritos y no fuerzan las cuerdas vocales. Incluso hoy en día, los jubilados de este pueblo del extremo meridional de Eubea, la segunda mayor isla de Grecia, utilizan en ocasiones esta eficiente forma pretecnológica de comunicación inalámbrica para transmitir de una casa a otra noticias, chismes o una invitación a desayunar.

Grabé la conversación entre Kefalas y Koula en mayo de 2004. Llevo investigando las lenguas silbadas en montañas remotas y selvas de todo el mundo desde principios del año 2000. En ese tiempo, tanto mi trabajo como el de otros colegas de profesión ha revelado la existencia de multitud de lenguas silbadas previamente desconocidas. Hemos medido las impresionantes distancias que pueden recorrer las palabras silbadas y hemos ampliado de manera considerable nuestros conocimientos sobre el modo de transmitir frases completas y sobre la manera en que el cerebro del receptor descifra las palabras.

LENGUAS OLVIDADAS

Mi interés por esta forma de comunicación nació hace casi veinte años, tras leer un artículo publicado en 1957 en *Scientific American* sobre el silbo gomero, una variante que aún se practica en la isla canaria de La Gomera. Decidí ampliar mis conocimientos

EN SÍNTESIS

Varias poblaciones rurales de todo el mundo han creado versiones silbadas de sus lenguas locales para comunicarse a distancia o en entornos con abundante vegetación.

Aunque la existencia de lenguas silbadas está documentada desde la Antigüedad, hasta hace poco la investigación lingüística al respecto ha sido escasa.

Varios trabajos recientes han identificado al menos 70 lenguas silbadas en todo el mundo. Su estudio permite abordar varias cuestiones lingüísticas desde otra perspectiva.

El interés por mantener vivas estas lenguas ha crecido en los últimos años. Entre otras iniciativas, en 1999 el Gobierno canario reguló la enseñanza del silbo gomero en las escuelas.

EIRINI VOURLOUMIS (*fotografías*)





LOS SILBIDOS de Georgia Yiannakari, de Antia, reciben la aprobación de Maria Kefala (*1, de rosa*), traductora experta de griego silbado. Yiannis Tsipas (*2, en el centro*) espera transmitir el silbo que aprendió de sus padres (al lado, su madre Aristi) a su hijo Vassilis.

sobre la materia y, en 2003, lo convertí en el tema principal de mi tesis doctoral.

Cuando se publicó aquel artículo, muy pocos investigadores mostraban interés por las lenguas silbadas, a pesar de que estas se conocen desde la Antigüedad. Ya Heródoto mencionaba a trogloditas etíopes que «hablaban como murciélagos» en *Melpómene*, el cuarto libro de sus *Historias*. Para 2003 el interés había aumentado, pero pocos lingüistas habían investigado los sonidos y significados transmitidos por el silbo, y la mayoría de los estudios únicamente se centraban en el silbo gomero.

En realidad, las lenguas silbadas no son un idioma distinto ni un dialecto de la lengua madre, sino más bien una extensión de esta. Sin embargo, en vez de usar la voz para pronunciar las palabras griegas *¿Boró na ého omeléta?* («¿Puedo tomar huevos revueltos?»), estas se articulan en forma de silbidos. Como consecuencia, los sonidos sufren un profundo cambio: no se generan a partir de las vibraciones de las cuerdas vocales, sino por una corriente de aire comprimido que sale de la boca y gira formando turbulentos remolinos al borde de los labios. Al igual que en el habla corriente, la lengua y la mandíbula de los silbantes se desplazan para dar lugar a las distintas palabras, si bien la libertad de movimientos es menor. Todo lo que cambia es el tono del silbido. En el habla corriente, en cambio, el timbre (una cualidad acústica que permite distinguir entre un sonido y otro, aparte del tono y el volumen) también puede variar.

Así pues, las palabras silbadas que pueden oírse en Antia siguen siendo griego. En ocasiones los lingüistas equiparan los silbidos con los susurros, ya que ambos constituyen modos alternativos de hablar un mismo idioma sin hacer vibrar las cuerdas vocales. El lingüista André Classe, autor del artículo de *Scientific American* que me inspiró, describió el silbo como un «esqueleto de información» natural. Classe también señaló que la inteligibilidad de esta forma de comunicación no siempre coincide con la del lenguaje hablado, si bien se le acerca bastante.

En mis primeras investigaciones descubrí enigmáticos documentos de viajeros, funcionarios coloniales, misioneros y antropólogos que describían alrededor de unas 12 lenguas silbadas. Tales pistas me llevaron a sospechar que debían existir otras en el mundo.

Junto con mi colaboradora Laure Dentel, a principios de la década del 2000 nos embarcamos en un trabajo de campo de 14 meses en el que visitamos varios lugares donde constaban indicios de esta práctica. Más tarde me uní a una red de investigadores para llevar a cabo nuevos estudios de campo en todo el mundo. Como parte de esta iniciativa, documenté el silbo de los wayãpi, un pueblo de la selva amazónica, junto con la lingüista Elissandra Barros da Silva en Brasil y el antropólogo Damien Davy en la Guayana francesa. Con Dentel estudié a los akha y los hmong del sudeste asiático, y con el lingüista Rachid Ridouane, a los bereberes tamazight del Atlas marroquí. En 2009,

Física del silbido

Las lenguas silbadas constituyen una versión del idioma local (como el griego, el turco o el español), en la que las palabras se comunican por medio de una corriente de aire comprimido que gira en pequeños remolinos al borde de los labios. A pesar de carecer de los armónicos de la voz, la banda de frecuencias usada para representar las vocales y las consonantes en una lengua no tonal, como el griego, basta para cumplir con las características esenciales del lenguaje. El fenómeno permite explorar de una manera no tradicional las facultades cognitivas del cerebro humano.

Las ondas sonoras generadas en un silbido pertenecen al intervalo de frecuencias que los ingenieros y los psicólogos consideran óptimo para ser detectado por el oído. Por esa razón, el silbo resulta más fácil de percibir que las ondas complejas del habla común, la cual contiene frecuencias en un intervalo mucho más amplio.

Máxima amplitud de un silbido: 120 dB
Máxima amplitud de un grito: 100 dB
Amplitud (dB)
Cuerdas vocales a 90-100 dB (*amarillo*)
Transición del habla normal al grito a 70-80 dB (*gris*)

Los silbidos pueden alcanzar una amplitud máxima (volumen) de 120 decibelios (dB), más que los 100 decibelios de un grito típico. Un grito a 100 decibelios fuerza enseguida las cuerdas vocales.

Frecuencia (kilohercios)
16, 15, 14, 13, 12, 11, 10, 9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0
Tiempo
Intervalo de la lengua hablada
Intervalo ideal para ser detectado
Intervalo del silbido
Intervalo del ruido de fondo natural

Cuando el sonido se propaga en condiciones ideales, pierde alrededor de 6 decibelios cada vez que se duplica la distancia a la fuente. Una señal acústica también se topa con obstáculos, como el terreno y los troncos de los árboles. La lengua hablada contiene un amplio registro de frecuencias, cada una de las cuales se dispersa de un modo diferente al entrar en contacto con un objeto físico. Un silbido, sin embargo, codifica toda la información en una banda más estrecha. Las frecuencias bajas resisten mejor la dispersión causada por las barreras físicas, como una vegetación densa. Esta propiedad les permite propagarse a mayores distancias.

Sonido de alta frecuencia
Obstáculo
Dispersión
Propagación
Sonido de baja frecuencia

Vocal (*azul*) Consonante (*blanco*)
Tono
Pásame el vino

En cada lengua silbada, como el silbo canario, la manera de pronunciar las vocales y las consonantes intenta parecerse a la de la lengua hablada, variando el tono o interrumpiendo el flujo de aire. De este modo, la mayoría de la información codificada en vocales y consonantes se transmite a través de variaciones en la frecuencia y la amplitud. El habla corriente también usa el timbre para identificar vocales y consonantes, las cuales se disipan rápidamente con la distancia. En cambio, los silbidos pueden oírse con claridad desde lejos.

Las características acústicas del silbido permiten que este se escuche a una distancia diez veces mayor que un grito, pudiendo alcanzar varios kilómetros en valles y otras áreas con buena transmisión acústica.



FUENTE: *WHISTLED LANGUAGES: A WORLDWIDE INQUIRY ON HUMAN WHISTLED SPEECH*, POR JULIEN MEYER. SPRINGER-VERLAG, 2015; AMANDA MONTAÑEZ (*gráficos*)

junto con Dentel y con el lingüista Denny Moore, comenzamos una colaboración en la división de lingüística del museo Emilio Goeldi de Pará, en la localidad brasileña de Belém. Nuestra tarea consistió en registrar el silbo del pueblo gavião, en el estado amazónico de Rondonia.

Para nuestros proyectos de investigación nos hemos servido de las últimas herramientas lingüísticas y acústicas, así como de técnicas procedentes de numerosos campos, desde la fonética y la psicolingüística hasta la bioacústica y la sociolingüística. Por ejemplo, para estudiar la comunicación con silbidos a larga distancia, empleamos los mismos métodos de grabación que manejan los expertos en bioacústica para investigar la manera en que se comunican los animales en libertad.

LINGÜÍSTICA DEL SILBO

Nuestros trabajos han revelado distintas maneras de transmitir palabras por medio de silbidos. El silbante puede fruncir los labios, silbar con los dedos o soplar una hoja o una sencilla flauta de madera. Algunos combinan las diferentes técnicas según lo lejos que deseen enviar el mensaje. Las palabras se construyen con esos sonidos dependiendo de si la lengua hablada de la que deriva el silbo utiliza cambios de tono para transmitir diferencias de significado, como ocurre en el mandarín o el cantonés, o de si los tonos solo sirven para enfatizar palabras, como en griego o en español. En una lengua tonal, elevar el tono en un silbido refleja la flexión ascendente del tono hablado. En las lenguas no tonales, sin embargo, un tono constante en el silbido representa una vocal (una *i* podría comunicarse con un silbido agudo, mientras que una *e* podría sonar en un tono más bajo). En cualquier clase de idioma, el silbante forma las consonantes modulando cuán abruptamente se altera el sonido cuando pasa de un tono a otro.

Hasta ahora, nuestro trabajo ha conseguido localizar unas 70 poblaciones que practican el silbo, la mayoría procedentes de lugares montañosos aislados o con vegetación exuberante. Son pocas si las comparamos con las cerca de 7000 lenguas que se hablan en el mundo, pero superan con creces las que conocíamos hace tan solo unos años. Como ya sugerían los primeros trabajos al respecto, en todos esos lugares las lenguas silbadas se emplean, sobre todo, cuando la distancia resulta excesiva para transmitir un mensaje gritando. Sin embargo, tienen también otros usos. Pueden emplearse en rituales de cortejo en el interior de una ciudad, para comunicarse en un entorno ruidoso o para intercambiar secretos en presencia de quienes no conocen el silbo («Escóndete, la policía va para allá»). También ayudan a los cazadores: en la selva amazónica, los animales reconocen la voz humana, pero no los silbidos.

El análisis acústico de la comunicación a larga distancia muestra que, con un clima y una topografía favorables, un silbido puede recorrer varios kilómetros. Su frecuencia abarca un intervalo de entre 0,9 y 4 kilohercios, casi el mismo que los ingenieros de telecomunicaciones consideran óptimo para identificar con exactitud los sonidos que forman las palabras. En un experimento que llevamos a cabo en un valle cerca de los Alpes franceses, el habla corriente llegó a 40 metros y los gritos a 200, pero los silbidos aún resultaban inteligibles a 700 metros. Aunque esa no es la distancia máxima que pueden alcanzar, el dato hace patentes las ventajas del silbo en condiciones normales, con algo de ruido de fondo y un viento suave.

Para los lingüistas, el estudio del silbo ha permitido demostrar la capacidad del cerebro humano para reconocer palabras y frases en una señal acústica que contiene menos información que la producida por la voz humana. Un silbido carece de los armónicos propios de la voz. Con todo, esta simple frecuencia modulada cumple el requisito esencial de toda lengua: transmitir información con claridad. Por tanto, el silbo se presenta como un recurso importante a la hora de explorar las capacidades cognitivas del cerebro para comunicarse de un modo no tradicional.

Hace décadas, el experto en bioacústica René-Guy Busnel, con quien colaboro desde que comencé mi tesis doctoral, llevó a cabo un estudio sobre la percepción del silbo entre los habitantes de Kuşköy, un pueblo de las montañas nororientales de Turquía. Usando una variante silbada del turco conocida como «lengua de los pájaros», los aldeanos reconocieron el 70 por ciento de las palabras aisladas a distancias cortas, frente al 95 por ciento de los términos del habla ordinaria. Incluso lograron detectar una frase entera alrededor de 8 veces de cada 10 en situaciones en las que las personas se encontraban lo bastante alejadas como para no poder verse las caras con claridad.

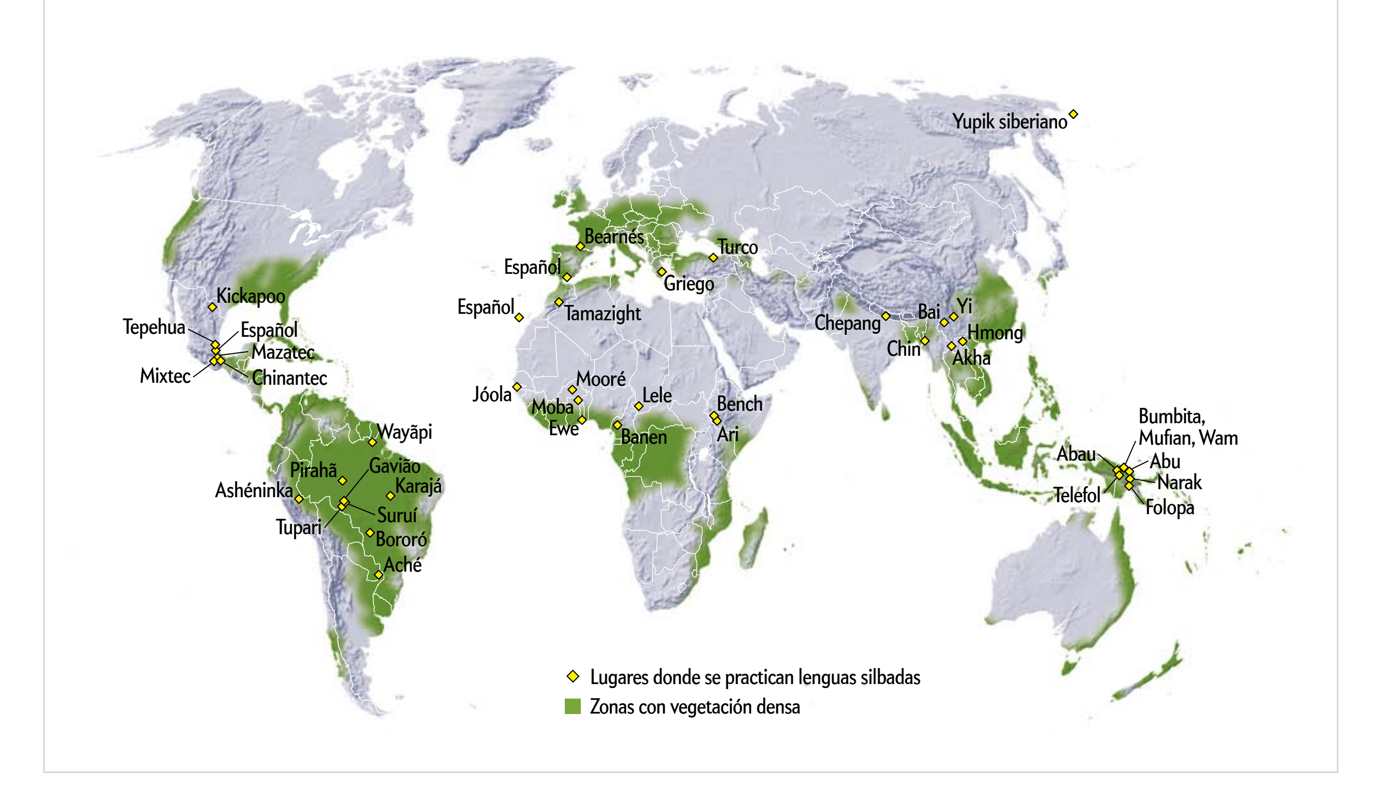
El análisis acústico de los silbidos indica que, en condiciones muy favorables, el sonido se transmite a varios kilómetros de distancia

Aquel estudio me inspiró para comenzar otro, publicado en 2013, en el que, junto con varios colaboradores, estudié la inteligibilidad de palabras habladas a medida que aumentaba la distancia entre el emisor y el receptor. Los resultados mostraron que, a una separación de 17 metros, la capacidad para reconocer palabras se ve reducida en un 70 por ciento. También hallamos que las consonantes más fácilmente identificables (las sibilantes, similares a los silbidos) se seguían reconociendo más de un 90 por ciento de las veces incluso a 33 metros de distancia. Estos resultados, combinados con los de Busnel sobre el turco silbado, sugieren que el silbo resulta más eficiente que el habla ordinaria cuando los interlocutores se comunican a distancias medias, de entre 20 y 30 metros.

También me pregunté cuán rápido podrían aprenderse los rudimentos del silbo. Aunque tradicionalmente esta técnica suele enseñarse a los niños poco después de que aprenden a hablar, decidí investigar los pasos iniciales en los adultos. Tras pedir a 40 estudiantes de habla francesa y española que escucharan silbo gomero, observé que todos distinguían con rapidez un componente obvio de cualquier palabra silbada española: las vocales *a*, *e*, *i*, *o*, *u* (en silbo gomero, esta última se silba igual que la *o*), si bien los españoles lo hicieron con algo más de precisión que los franceses. Ambos grupos clasificaron correctamente las vocales muy por encima del azar, aunque no tan bien como un hablante experto de silbo gomero.

Las lenguas silbadas en el mundo

En los últimos quince años se han documentado hasta un total de 70 lenguas silbadas en todo el mundo, una cifra muy superior a la docena que se conocían con anterioridad. Aquellas que han sido registradas u objeto de estudio se muestran en este mapa. Si los hábitos modernos no acaban con esta forma de comunicación, cabe esperar que con el tiempo se descubran otras. Las lenguas silbadas se emplean a menudo para comunicarse a largas distancias en zonas boscosas o montañosas.



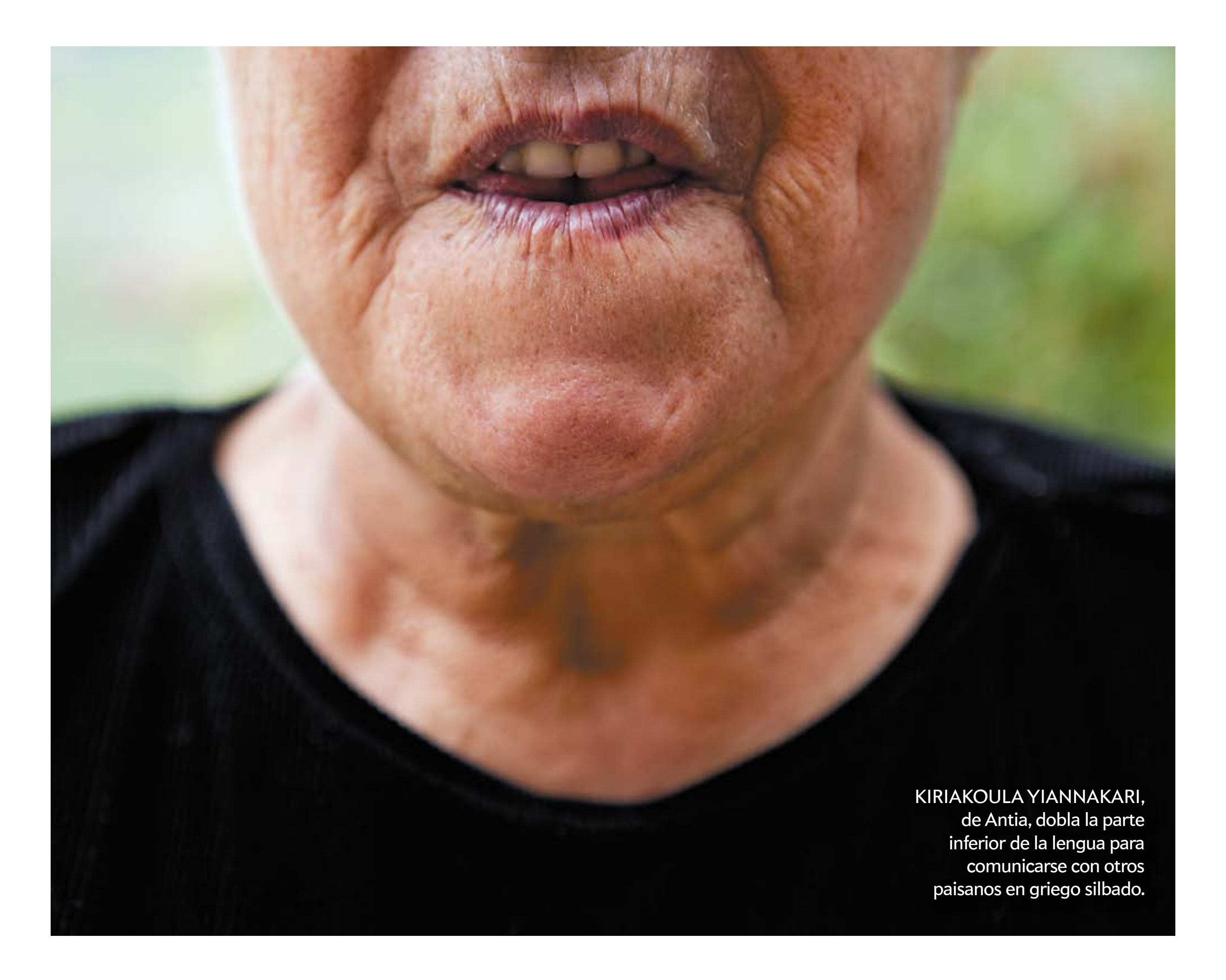
FUENTE: *WHISTLED LANGUAGES: A WORLDWIDE INQUIRY ON HUMAN WHISTLED SPEECH,* POR JULIEN MEYER. SPRINGER-VERLAG, 2015; MAPPING SPECIALISTS (*mapa*)

EL SILBO EN EL CEREBRO

La neurobiología del silbo constituye un campo en gran medida inexplorado. Solo en fecha reciente se ha empezado a estudiar qué sucede en las áreas cerebrales asociadas al lenguaje cuando una persona se comunica con silbidos. En 2005, un estudio publicado en *Nature* por Manuel Carreiras, por entonces en la Universidad de La Laguna, y sus colaboradores halló que las zonas responsables de la comprensión del lenguaje (las regiones temporales del hemisferio izquierdo) se activan en los silbantes experimentados cuando escuchan silbo gomero. Este resultado implica que las mismas áreas que sabemos relacionadas con el lenguaje pueden procesar palabras a partir de una señal auditiva simple, consistente en cambios en el tono (algo parecido a una melodía musical), en silbantes experimentados, pero no en personas sin conocimientos al respecto.

Onur Güntürkün, de la Universidad del Ruhr en Bochum, se propuso averiguar si la actividad cerebral asociada al silbo se limitaba al hemisferio izquierdo. Reunió a hablantes de lengua silbada turca para analizar la tesis tradicional de que es en este hemisferio donde tiene lugar la mayor parte del procesamiento del lenguaje. Varios estudios previos habían mostrado que el hemisferio izquierdo es, de hecho, el centro dominante del lenguaje para las lenguas tonales, las atonales y las no vocalizadas, como las lenguas de chasquidos y el lenguaje de signos. Güntürkün se preguntó hasta qué punto participaría el hemisferio derecho (asociado al procesamiento de la melodía y el tono) en el lenguaje silbado. En 2015, él y sus colaboradores publicaron en *Current Biology* los resultados de un experimento efectuado con habitantes de Kuşköy. Sometieron a los participantes a sencillos exámenes de audición y descubrieron que usaban ambos hemisferios casi por igual

Las lenguas silbadas permiten explorar desde una nueva óptica el modo en que el cerebro procesa la información auditiva



KIRIAKOULA YIANNAKARI, de Antia, dobla la parte inferior de la lengua para comunicarse con otros paisanos en griego silbado.

cuando escuchaban sílabas silbadas, pero sobre todo el izquierdo si se trataba de sílabas habladas. Este resultado aún deberá confirmarse con otras variantes de silbo, pero por ahora desafía la idea vigente de que es el hemisferio izquierdo el que domina la comprensión del lenguaje.

Tales estudios demuestran que las lenguas silbadas pueden ayudarnos a entender mejor la manera en que el cerebro procesa la información. Quien escribe apoya estas iniciativas de investigación desde dos organizaciones: la Asociación Mundial para la Investigación del Silbo, en funcionamiento desde 2002, y una creada en 2015 por el GIPSA-lab, mi laboratorio en el CNRS francés.

Quienes estudian las lenguas silbadas pueden también recibir apoyo de varios proyectos recientes concebidos para preservar esta forma de comunicación única como parte del legado cultural de varios pueblos. Un papel pionero en este sentido lo han desempeñado las islas Canarias. En 1999, La Gomera reguló la enseñanza del silbo gomero en las escuelas, a lo que se sumó un programa gubernamental para formar a profesores de silbo. El deseo de revivir esta práctica ha inspirado varias iniciativas, como la Asociación Cultural y de Investigación del Silbo Canario Hautacuperche, una organización que proporciona cursos de silbo y que incluso lanzó una aplicación para móviles, Yo Silbo, para aprender la lengua a partir de frases silbadas correctamente.

Si se consolidan iniciativas similares, silbar para que nos traigan la cena podría convertirse en una realidad. Eso ayudaría a preservar una forma de comunicación que nos está ayudando a entender hasta qué punto unos simples tonos agudos pueden moldearse para transmitir pensamientos complejos. IyC

PARA SABER MÁS

The whistled language of La Gomera. André Classe en *Scientific American*, abril de 1957.

Typology and acoustic strategies of whistled languages: Phonetic comparison and perceptual cues of whistled vowels. Julien Meyer en *Journal of the International Phonetic Association*, vol. 38, n.º 1, págs. 69-94, abril de 2008.

The study of tone and related phenomena in an Amazonian tone language: Gavião of Rondônia. Denny Moore y Julien Meyer en *Language Documentation & Conservation*, vol. 8, págs. 613-636, diciembre de 2014.

Whistled languages: A worldwide inquiry on human whistled speech. Julien Meyer. Springer-Verlag, 2015.

Whistled Turkish alters language asymmetries. Onur Güntürkün et al., en *Current Biology*, vol. 25, n.º 16, págs. R706-R708, agosto de 2015.

Asociación Mundial para la Investigación del Silbo: **www.theworldwhistles.org**

EN NUESTRO ARCHIVO

La conservación de las lenguas moribundas. W. Wayt Gibbs en *IyC*, octubre de 2002.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik



Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.

Interfaces inestables

En un vaso de agua puesto boca abajo, la presión atmosférica debería compensar el peso del fluido. ¿Por qué se derrama?

La bebida contenida en una pajita no fluye si tapamos el extremo superior. En cambio, resulta imposible mantener esa misma bebida en un vaso puesto en vertical y boca abajo. ¿Por qué? La respuesta la hallamos en la inestabilidad de Rayleigh-Taylor, la cual afecta a la interfaz entre dos fluidos cuando el que se encuentra situado encima es más denso que el de abajo. Dicha inestabilidad se manifiesta en las botellas agujereadas, en los vasos puestos al revés, en las lámparas de lava o en los magníficos jaspeados del artista mexicano David Alfaro Siqueiros (1896-1974).

Comencemos por efectuar un sencillo experimento. Echemos agua en un vaso sin llenarlo del todo, tapémosle la boca con un trozo de cartón y pongamos el conjunto boca abajo, sujetando el cartón para que el agua no fluya. Cuando la hoja vuelva a encontrarse en posición horizontal, soltémosla. Veremos que no cae, sino que continúa pegada al vaso, sin que el líquido se derrame. ¿Cómo explicarlo?

Se trata de un simple equilibrio de presiones. Cuando el vaso está boca arriba, el aire que se encuentra sobre el agua se halla a presión atmosférica. Por tanto, la presión en el fondo del recipiente será igual a dicha presión más la presión hidrostática correspondiente a la altura de la columna de agua. Supongamos que esta sea de unos 5 centímetros. La presión hidrostática valdrá entonces el 0,5 por ciento de la presión atmosférica (en el agua, la presión aumenta una atmósfera por cada diez metros de profundidad).

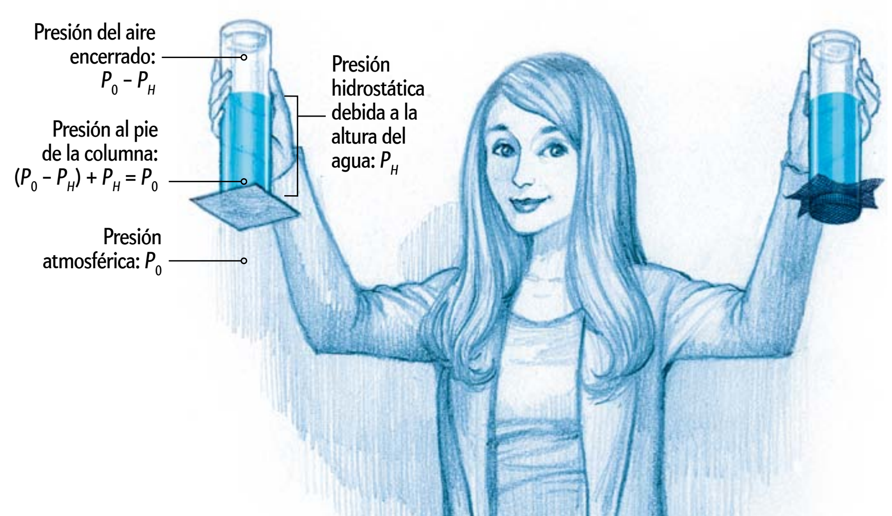
Una vez que se invierte el vaso y se suelta la hoja, la presión sobre esta rebasa levemente la presión atmosférica. Como consecuencia, el conjunto formado por el líquido y la hoja comienza a caer en bloque. Cuando esto ocurre, el volumen del aire contenido en el vaso aumenta, su presión disminuye y, cuando esta se ha reducido en un 0,5 por ciento, la presión a ras de la hoja se iguala a la atmosférica, por lo que la caída se detiene. Si la altura del aire situado encima del agua era de un centímetro, pongamos por caso, podemos calcular con facilidad que el conjunto agua-hoja habrá descendido en una imperceptible vigésima de milímetro.

¿Qué sucede si retiramos el cartón tirando de él con rapidez en la dirección horizontal? Lo dicho hasta ahora nos llevaría a pensar que el agua puede permanecer en el vaso: dado que, tras la minúscula caída, la presión en la interfaz aire-agua es la misma en el aire y en el líquido, el equilibrio mecánico parece asegurado. No obstante, la experiencia muestra que dicho equilibrio es inestable: al retirar el cartón, el agua se derramará. En cambio, si sustituimos el cartón por una malla fina, un tejido o una gasa tensos, el equilibrio persistirá. ¿A qué se debe este fenómeno?

Inestabilidades y tensión superficial

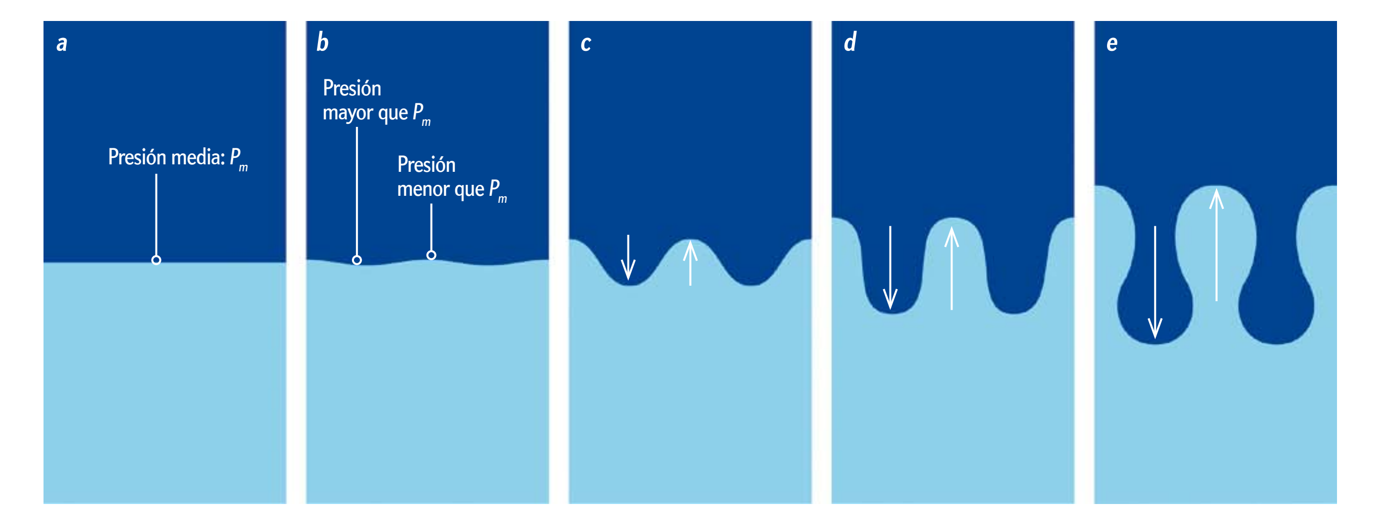
Para entenderlo, imaginemos que la interfaz entre dos fluidos sufre una pequeña perturbación, la cual podemos imaginar como ondulaciones muy leves de amplitud $+A$ y $-A$ con respecto a un nivel medio. El fluido más denso (el agua, en nuestro caso), de densidad ρ_1, se encuentra situado sobre el segundo, de densidad ρ_2 (donde $\rho_1 > \rho_2$).

En los valles con respecto a la línea horizontal media, la altura de la columna de fluido denso aumenta en A. Por tanto, la presión hidrostática en ese lugar se incrementará en $(\rho_1 - \rho_2)gA$ con respecto a la presión media, donde g denota la aceleración de la gravedad. En las crestas ocurre lo contrario: la presión disminuye en la



EL LÍQUIDO CONTENIDO EN UN VASO INVERTIDO cuya boca se encuentra tapada con una hoja de cartón (*izquierda*) o con una gasa o malla fina (*derecha*) no se derrama. En cambio, si retiramos el cartón o la gasa, el líquido caerá a pesar del equilibrio inicial entre presiones. El proceso se debe a que la interfaz líquido-aire se torna inestable.

ILUSTRACIONES DE BRUNO VACARO



LA INESTABILIDAD DE RAYLEIGH-TAYLOR aparece en la interfaz entre dos fluidos cuando el que se encuentra situado arriba (*azul oscuro*) es más denso que el de abajo (*azul claro*). Aunque la interfaz sea inicialmente plana y horizontal (*a*), la aparición de pequeñas perturbaciones resulta inevitable (*b*). En un valle, la presión que ejerce el fluido más denso supera a la presión media, P_m, por lo que el valle se agranda; de igual modo, las crestas también crecen, ya que en ellas la presión es inferior a la media (*c*). Como consecuencia, la interfaz entre ambos fluidos se desestabiliza y uno penetra en el otro (*d, e*).

misma cantidad. Por tanto, en los valles la interfaz se ve impulsada hacia abajo, mientras que en las crestas es «aspirada» hacia arriba. En otras palabras: las ondulaciones se amplifican, lo que desestabiliza la interfaz. Este fenómeno se conoce como inestabilidad de Rayleigh-Taylor, así llamada en honor de los físicos ingleses John Rayleigh (1842-1919) y Geoffrey Taylor (1886-1975).

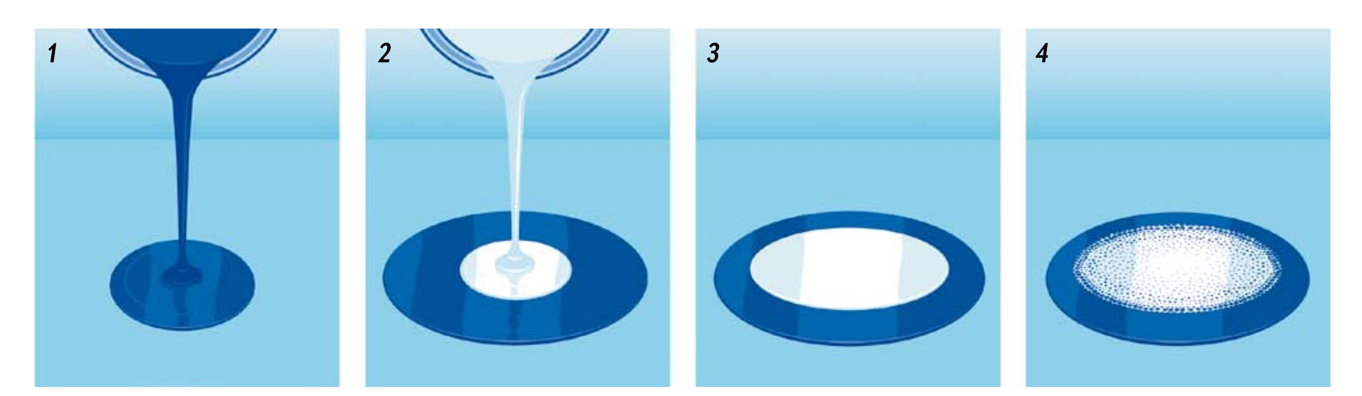
Pero ¿cómo explicar que, si empleamos una malla fina para contener el agua, la interfaz entre ambos fluidos permanezca estable? Ello se debe a que en este caso interviene la tensión superficial, la cual se opone a todo aumento de área de la interfaz. Cuando la superficie no es plana, la tensión superficial genera una sobrepresión en las partes cóncavas con respecto a las convexas, la cual propicia un desplazamiento de los fluidos que tiende a aplanar la interfaz, como si se tratase de una superficie elástica.

Tales sobrepresiones solo contrarrestan los efectos de la presión hidrostática si la amplitud característica de las ondulaciones, o de la perturbación de la interfaz, resulta inferior a la llamada «longitud de capilaridad». Para una interfaz aire-agua, dicha cantidad asciende a unos 3 milímetros. En la práctica, eso significa que, en un orificio de ese diámetro, predomina la tensión superficial y la interfaz resulta estable. En cambio, en un orificio mayor se impone la gravedad: aparece la inestabilidad de Rayleigh-Taylor y la interfaz se desestabiliza. Por otro lado, la tensión superficial es también la responsable de que, en nuestro primer experimento, el agua no se cuele por el pequeño intersticio entre la hoja de cartón y el canto del vaso.

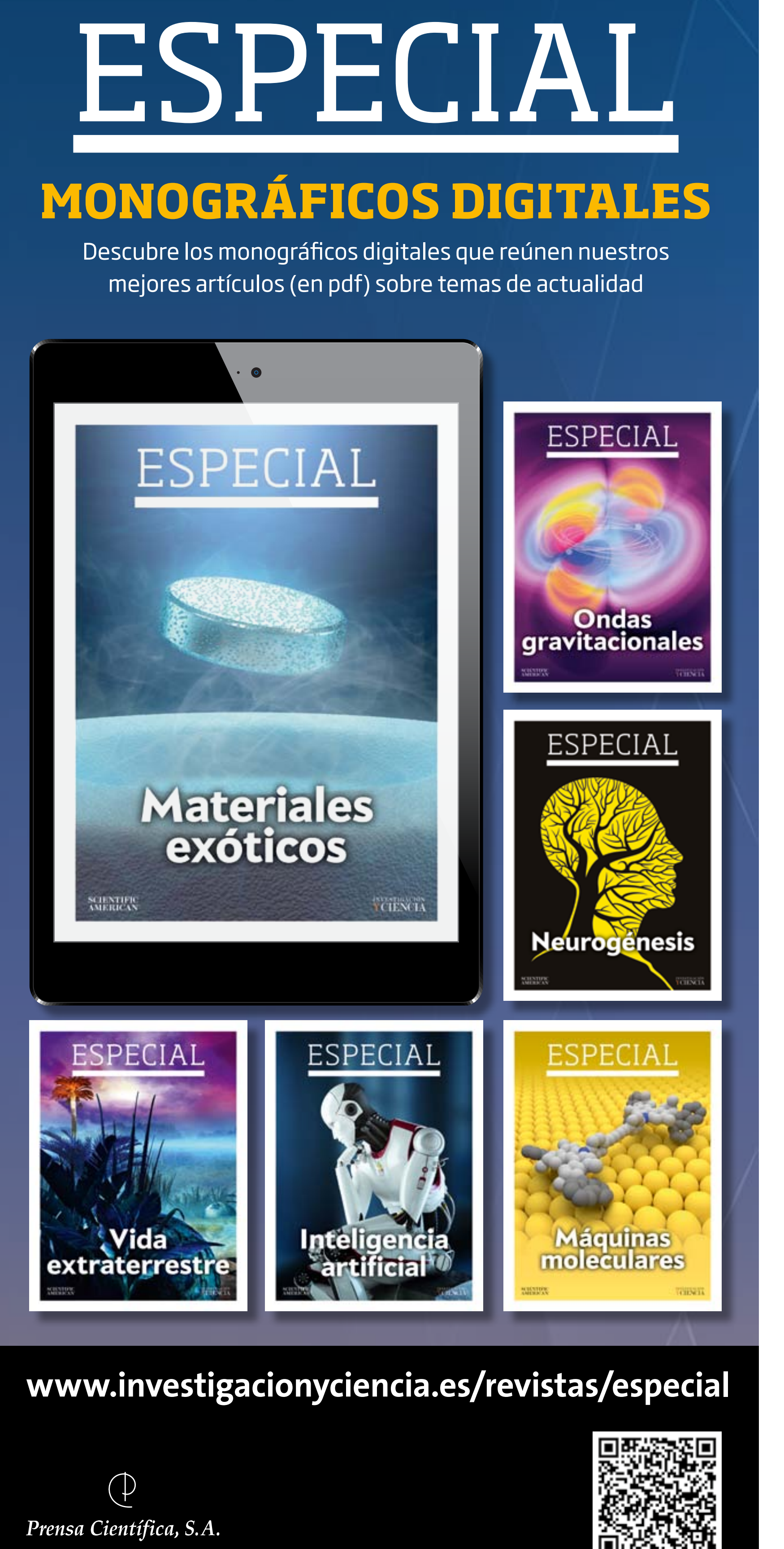
Lámparas de lava y obras de arte

Lo que ocurre una vez iniciada la inestabilidad de Rayleigh-Taylor depende de numerosos parámetros, los más destacados de los cuales son la viscosidad de los fluidos y la tensión superficial de la interfaz. La penetración de un fluido en el otro puede tener lugar mediante la formación de «dedos», los cuales crecen hasta adoptar un aspecto similar al de una seta o se desprenden formando burbujas.

Eso es lo que se observa en las lámparas de lava, tan de moda hace unas décadas. En estos objetos, a temperatura ambiente hay una mezcla de aceites minerales, parafina y tetracloruro de carbono situada bajo una capa de agua. El



EN SUS «PINTURAS ACCIDENTALES», el artista mexicano David Alfaro Siqueiros depositaba una primera capa de pintura (*1, azul oscuro*), sobre la cual vertía después una segunda de otro color (*blanco*) y algo más densa (*2*). Como consecuencia, transcurridos pocos segundos (*3*) se desarrollaba la inestabilidad de Rayleigh-Taylor: la pintura de la capa inferior ascendía en algunos puntos y dejaba manchas, en un proceso que continuaba hasta que la pintura se secaba (*4*).



conjunto se halla encima de una lámpara. Cuando esta se enciende, la interfaz de ambos fluidos se encuentra perfectamente horizontal.

Transcurrido un tiempo, el caldeo causado por la lámpara dilata el fluido situado en la parte inferior. Este se torna menos denso, aparece la inestabilidad de Rayleigh-Taylor y el líquido se eleva lentamente en forma de burbujas impulsadas por el empuje de Arquímedes. Al llegar a lo alto de la lámpara, el fluido se enfría, su densidad aumenta y regresa al fondo, con lo que el ciclo se repite.

Las obras de David Alfaro Siqueiros nos ofrecen otro ejemplo en el que la inestabilidad de Rayleigh-Taylor desempeña un papel clave. En 1936, el artista mexicano inventó una técnica a la que llamó «pintura accidental». Sobre un lienzo horizontal, se vierte una primera capa de pintura que se deja extender progresivamente hasta alcanzar un espesor de entre uno y dos milímetros. Luego, sobre esa primera capa se vierte una segunda, de otro color y, sobre todo, algo más densa. En un principio, esta cubrirá a la primera. Pero, al cabo de algunas decenas de segundos, la inestabilidad de Rayleigh-Taylor hará que el primer color reaparezca formando figuras al azar, las cuales van aumentando de tamaño hasta que la pintura se seca.

Hace poco, el análisis y las mediciones de los físicos han permitido confirmar los tamaños típicos que alcanzan estas figuras, los cuales dependen principalmente de las densidades de los fluidos y de su tensión superficial. Aunque, desde luego, tales estudios no permiten explicar la potencia estética de obras como *Suicidio colectivo* o *El nacimiento del fascismo*.

PARA SABER MÁS

An overview of Rayleigh-Taylor instability. D. H. Sharp en *Physica D*, vol. 12, págs. 3-18, julio de 1984.

A hydrodynamic instability is used to create aesthetically appealing patterns in painting. Sandra Zetina, Francisco A. Godínez y Roberto Zenit en *PLoS ONE*, vol. 10, n.º 5, e0126135, mayo de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La inestabilidad de Rayleigh-Taylor: Interfaces entre fluidos de distinta densidad. Antonio R. Piriz en *IyC*, mayo de 2006.

por Erica Klarreich



Erica Klarreich es doctora en matemáticas por la Universidad de Stony Brook y diplomada en el Programa de Comunicación de la Ciencia de la Universidad de California en Santa Cruz. Sus trabajos sobre divulgación de las matemáticas han aparecido en las antologías *The best writing on mathematics 2010* y *The best writing on mathematics 2011*, de Princeton University Press.

Un algoritmo para repartir una tarta

¿Cómo dividir un pastel entre un número arbitrariamente grande de comensales de manera que todos queden satisfechos?

El año pasado, dos jóvenes teóricos de la computación lograron resolver un problema con el que los matemáticos llevaban décadas luchando: cómo repartir una tarta de manera justa entre un número arbitrario de personas. Su trabajo dejó perplejos a los numerosos investigadores que pensaban que era poco probable que existiese un protocolo de división justa de ese tipo.

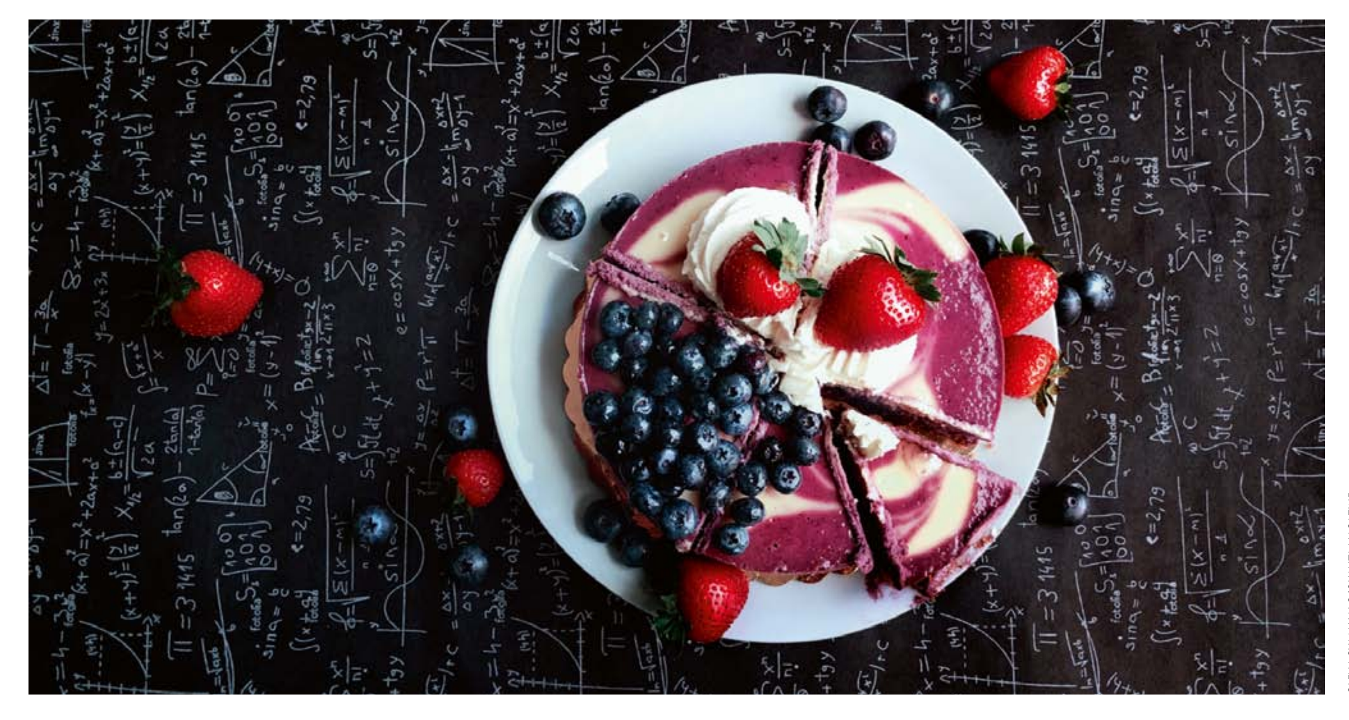
El pastel funciona aquí como metáfora de un amplio conjunto de problemas del mundo real en los que hay que repartir algún objeto continuo —ya se trate de una tarta o de una extensión de tierra— entre varias personas, cada una de las cuales valora sus características de manera diferente: unas se desviven por el glaseado de chocolate, pongamos por caso, mientras que otras no apartan la vista de las flores de crema.

Al menos desde tiempos bíblicos se sabe que hay una forma de repartir un objeto entre dos personas de modo que, al final, ambas queden satisfechas: una lo divide en dos trozos que para ella tengan el mismo valor, y la otra elige cuál prefiere. En el libro del Génesis, Abraham (por entonces Abram) y Lot se valieron de este truco de «yo corto, tú escoges» para repartir la tierra: Abraham decidió cómo dividirla y Lot pudo escoger entre Canaán y el este del río Jordán.

Hacia 1960, los matemáticos concibieron un algoritmo similar para tres jugadores. Pero, hasta ahora, lo mejor que se había conseguido para más de tres agentes era un procedimiento ideado en 1995 por el politólogo Steven Brams, de la Universidad de Nueva York, y el matemático Alan Taylor, del Union College de Schenectady, también en Nueva York. Dicho protocolo garantizaba una división justa, pero no estaba acotado; es decir, podía necesitar un millón de pasos hasta llegar al reparto, mil millones o cualquier otra gran cantidad de ellos en función de las preferencias de los jugadores.

En su momento, el algoritmo de Brams y Taylor fue alabado como un gran avance en el campo. Sin embargo, «el hecho de que no estuviese acotado suponía una gran desventaja», explica Ariel Procaccia, teórico de la computación de la Universidad Carnegie Mellon y uno de los creadores de Spliddit, una herramienta gratuita en línea que proporciona algoritmos de división justa para cuestiones como repartir el alquiler o las labores domésticas entre compañeros de piso.

Durante los últimos cincuenta años, numerosos matemáticos y teóricos de la



OLENA SHMAHALO/*QUANTA MAGAZINE*

computación, Procaccia incluido, se habían convencido de que probablemente no hubiese ningún algoritmo justo y acotado para repartir un pastel entre n jugadores. «Ese fue precisamente el problema que me llevó a estudiar los repartos justos», explica Walter Stromquist, profesor de matemáticas en el Colegio Universitario Bryn Mawr, en Pensilvania, quien en 1980 demostró varios resultados muy influyentes sobre el problema del reparto de pasteles. «Toda mi vida he pensado que volvería a ello cuando tuviese tiempo y que demostraría que esa extensión particular del resultado era imposible.»

En abril del año pasado, sin embargo, dos teóricos de la computación superaron todas las expectativas cuando publicaron un artículo en línea en el que describían un algoritmo de reparto justo cuyo tiempo de cómputo solo dependía del número de jugadores, no de sus preferencias individuales. Uno de ellos, Simon Mackenzie, por entonces investigador posdoctoral de 27 años en Carnegie Mellon, presentó el resultado el pasado 10 de octubre en el Simposio sobre Fundamentos de la Teoría de la Computación del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE), uno de los congresos anuales más prestigiosos en ciencias de la computación.

El algoritmo resulta extraordinariamente complejo: dividir un pastel entre n comensales puede requerir hasta $n\hat{}n\hat{}n\hat{}n\hat{}n\hat{}n$ pasos (donde el símbolo ^ se usa aquí para expresar «elevado a») y un número equiparable de tajadas. Incluso para unos pocos jugadores, dicha cifra supera la cantidad de átomos existentes en el universo. Con todo, los investigadores ya cuentan con algunas ideas para simplificar y acelerar el algoritmo, señala Haris Aziz, el otro miembro del equipo. Aziz, de 36 años, es teórico de la computación en la Universidad de Nueva Gales del Sur y en Data61, un grupo de investigación australiano. Procaccia asegura que, para quienes se dedican a la teoría de la división justa, este es definitivamente «el mayor resultado en décadas».

Trozos de pastel

El algoritmo de Aziz y Mackenzie se basa en un elegante procedimiento ideado de manera independiente por los matemáticos John Selfridge y John Conway hacia 1960. Dicho algoritmo determina cómo repartir un pastel entre tres personas.

Si Alicia, Benito y Carlos desean dividir una tarta, el protocolo establece que,

¿CÓMO REPARTIR UN PASTEL ENTRE TRES PERSONAS?

El siguiente diagrama muestra el proceso de reparto de un pastel entre tres personas, cada una de las cuales valora las porciones de distinta manera. El objetivo consiste en efectuar un reparto que satisfaga a todos por igual. Tras décadas de intentos, el año pasado este problema consiguió resolverse para un número arbitrario de jugadores en un número acotado de pasos.

1. Alicia, Benito y Carlos desean repartir un pastel de modo que, al final, ninguno codicie la porción de otro.

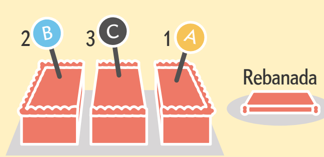
2. Carlos divide el pastel en tres pedazos que resultan igualmente apetitosos desde su punto de vista.

3. Alicia y Benito señalan qué trozo prefieren. Si escogen porciones distintas, el juego termina. Si ambos eligen la misma, las cosas se complican.

4. Benito corta una pequeña rebanada de su porción favorita, de modo que la parte que quede resulte tan valiosa como su segunda opción.

Rebanada

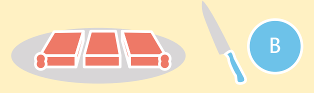
5. Tras reservar la rebanada, los jugadores eligen en el orden siguiente: primero Alicia*, luego Benito y finalmente Carlos.



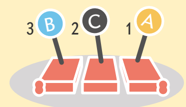
Todos se encuentran satisfechos con el reparto:
... Alicia, porque escogió el trozo que prefería.
... Benito, porque su segunda opción resultaba tan valiosa como la primera.
... Carlos, porque las tres porciones originales resultaban igualmente apetitosas desde su punto de vista.

*Si Alicia no elige la porción recortada, Benito deberá escogerla. En ese caso, Alicia y Benito intercambian sus papeles para el resto del proceso.

6. Para repartir la rebanada, primero Benito la divide en tres partes igualmente valiosas para él.



7. Ahora los jugadores eligen qué porción prefieren en el siguiente orden: primero Alicia, luego Carlos y por último Benito.



Todos se encuentran satisfechos con el reparto:
... Alicia, porque escogió el trozo que prefería.
... Carlos, porque eligió antes que Benito (y porque le resultaba indiferente qué porción de rebanada se llevase Alicia).
... Benito, porque las tres porciones de rebanada eran igualmente apetitosas desde su punto de vista.

LUCY READING-IKKANDA/*QUANTA MAGAZINE*

en primer lugar, Carlos deberá cortar el pastel en tres porciones igualmente valiosas desde su punto de vista. Después, Alicia y Benito dirán qué trozo prefieren. Si son distintos, habremos concluido: cada uno se lleva la porción que prefiere, Carlos toma la que sobra y todos marchan felices a casa.

Si Alicia y Benito desean el mismo pedazo, entonces Benito deberá extraer de él una pequeña rebanada, de tal modo que la parte que quede tenga el mismo valor que su segunda elección. La rebanada extraída se reserva para más adelante. Ahora Alicia toma el trozo que prefiere de los tres disponibles. Luego lo hará Benito, con la condición de que, si Alicia no escogió la porción recortada, él deberá llevársela. Por último, Carlos tomará el tercer pedazo.

Llegados aquí, ningún jugador envidia la elección de otro. Alicia está satisfecha, pues ha elegido primero. Benito también, ya que ha acabado con uno de sus dos trozos preferidos, los cuales eran igualmente valiosos para él. Y lo mismo ocurre con Carlos, pues ha conseguido una de las tres piezas originales, las cuales eran idénticas desde su punto de vista.

Sin embargo, aún queda por repartir la pequeña rebanada que extrajo Benito. Lo que hace que resulte posible dividirla sin caer en un bucle infinito de más y más divisiones y elecciones es el hecho de que Carlos está más que contento con su porción de pastel: no se sentiría engañado aunque quien se llevó la porción recortada obtuviese también toda la rebanada que queda por repartir, ya que la porción recortada más la rebanada equivalen a uno de los tres pedazos originales. Aziz y Mackenzie expresan esta relación entre los jugadores diciendo que Carlos «domina» a quien tomó la porción recortada.

Si, por ejemplo, fue Alicia quien se llevó la porción recortada, el algoritmo procede ahora como sigue: Benito divide la rebanada en tres pedazos que considera igualmente valiosos; después Alicia escoge uno, luego Carlos y finalmente Benito. Todos vuelven a estar satisfechos: Alicia, porque escogió primero; Carlos, porque ha elegido un pedazo mejor que el de Benito (y porque no le importaba cuánto se hubiese llevado Alicia); y Benito, porque esos tres pedazos eran igualmente apetitosos desde su punto de vista.

En su algoritmo de 1995, Brams y Taylor emplearon la noción de dominación —aunque no la llamaron de esa manera—, pero no consiguieron explotarla para obtener un algoritmo acotado. Durante los veinte años que siguieron, nadie consiguió mejorar el resultado. «No creo que sea por no haberlo intentado», apunta Procaccia.

Pasteleros novatos

Cuando Aziz y Mackenzie decidieron abordar el problema hace poco más de dos años, ambos eran relativamente primerizos en el problema del reparto justo. «No teníamos tanta formación como quienes habían estado trabajando intensamente en él», reconoce Aziz. «Aunque eso suele suponer un obstáculo, en este caso creo que nos benefició, ya que no estábamos pensando de la misma manera».

Aziz y Mackenzie comenzaron a tantear el terreno estudiando desde cero el problema para tres jugadores. Su análisis finalmente les permitiría encontrar un algoritmo acotado para el caso de cuatro agentes, el cual publicaron en línea en 2015. En un principio no supieron ver cómo extenderlo a más de cuatro jugadores, pero se zambulleron febrilmente en el problema. «Tras publicar nuestro artículo para el caso de cuatro agentes, estábamos realmente entusiasmados con la idea de intentarlo antes de que alguien con mucha más experiencia e ingenio lo generalizase al caso de n agentes», explica Aziz. Un año después, sus esfuerzos rindieron fruto.

Al igual que el algoritmo de Selfridge-Conway, el enrevesado protocolo de Aziz y Mackenzie se basa en pedir repetidas veces a los distintos jugadores que dividan el pastel en n piezas idénticas, para después solicitar a otros participantes que extraigan rebanadas y elijan. Sin embargo, su algoritmo también implica otros pasos, como intercambiar de manera periódica porciones de pastel de forma cuidadosamente controlada, con vistas a aumentar las relaciones de dominación entre los jugadores.

Son esas relaciones de dominación las que han permitido a Aziz y Mackenzie reducir la complejidad del problema: si, por ejemplo, tres jugadores dominan a todos los demás, pueden irse a casa con sus respectivas porciones de tarta, ya que estarán satisfechos con ellas independientemente de quién se lleve las rebanadas sobrantes. Eso hace que queden menos jugadores de los que preocuparse y que, después de un número acotado de pasos, el pastel se reparta por completo y todos acaben felices.

«Al mirar atrás y ver lo enrevesado que es el algoritmo, no sorprende que pasase tanto tiempo antes de que alguien encontrase uno», señala Procaccia. Sin embargo, Aziz y Mackenzie creen que podrán simplificar su algoritmo de manera considerable hasta convertirlo en uno que no requiera intercambios de pastel y que lleve menos de $n\hat{}n\hat{}n$ pasos.

Brams opina que es poco probable que un algoritmo más simple tenga consecuencias prácticas: las porciones que típicamente recibiría cada jugador incluirían numerosas pequeñas migajas de diferentes partes del pastel, lo que no proporcionaría un enfoque práctico si de lo que se trata es, por ejemplo, de repartir una extensión de terreno. A pesar de todo, para los matemáticos y teóricos de la computación que estudian el problema, el nuevo resultado «reinicia la cuestión», observa Stromquist.

Ahora que se sabe que es posible repartir de manera justa un pastel en un número acotado de pasos, Procaccia dice que la nueva meta consistirá en entender el inmenso océano que separa la cota superior de Aziz y Mackenzie y el límite inferior existente en el número de cortes para dividir un pastel. En su día, Procaccia demostró que un algoritmo de reparto justo necesitaría al menos n^2 pasos. Sin embargo, esa cifra palidece en comparación con $n\hat{}n\hat{}n\hat{}n\hat{}n\hat{}n$ o incluso con $n\hat{}n\hat{}n$. Aziz señala que ahora los investigadores deberán encontrar cómo achicar esa brecha. «Creo que es posible avanzar en ambas direcciones», concluye el investigador. IyC

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



PARA SABER MÁS

An envy-free cake division protocol. Steven J. Brams y Alan D. Taylor en *The American Mathematical Monthly*, vol. 102, n.º 1, págs. 9-18, enero de 1995.

Thou shalt covet thy neighbor's cake. Ariel D. Procaccia en *Proceedings of the 21st International Joint Conference on Artifical Intelligence*, págs. 239-244, julio de 2009.

A discrete and bounded envy-free cake cutting protocol for any number of agents. Haris Aziz y Simon Mackenzie en *Proceedings of the IEEE 57th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, págs. 416-427, octubre de 2016.



RELAZIONI ACCADEMICHE
Amedeo Avogadro
Edición de Marco Ciardi y Mariachiara di Matteo
Leo S. Olschki Editore, 2016.

Amedeo Avogadro

Su relación con las sociedades e instituciones del siglo XIX

Entre las primeras definiciones que el alumno de secundaria encuentra cuando empieza a manejar diccionarios de unidades y de teorías se encuentran la ley de Avogadro y el número de Avogadro. La ley establece que, a la misma temperatura y presión, los volúmenes iguales de todos los gases contienen idéntico número de moléculas. El *Dent dictionary of measurement,* a propósito del número de Avogadro, N_A, expone que el número de moléculas (átomos o iones) en un mol de una sustancia cualquiera es igual a $6{,}02253 \times 10^{23}$.

Avogadro introdujo su famosa ley en 1811, en el artículo *Essai d'une manière de déterminer les masses relatives des molecules élémentaires des corps, et les proportions selon lesquelles elles entrent dans ces combinaison*, que publicó en el prestigioso *Journal de Physique, de Chimie et d'Histoire Naturelle*. Allí escribió: «Es, pues, necesario admitir que existen allí relaciones muy sencillas entre los volúmenes de las sustancias gaseosas y el número de moléculas simples o complejas que lo forman. A este respecto, la hipótesis que se presenta y que pareciera ser la única admisible es suponer que, en cualquier gas, el número de moléculas integrantes es siempre el mismo a igual volumen, o es siempre proporcional a los volúmenes». Tres años después arribó a conclusiones parecidas André-Marie Ampère. Su hipótesis, dirigida a explicar los resultados de Gay-Lussac, se encuentra incluida en una carta a Berthollet.

Avogadro se percató pronto del valor extraordinario de tal hipótesis, pero murió antes de recibir el reconocimiento de la comunidad científica. Sus contemporáneos no comprendieron el sentido de su conjetura y esta no se aceptó hasta 1858, gracias a la intervención de Stanislao Cannizzaro (1826-1910). Disponemos hoy de un extenso repertorio de pruebas de que Avogadro tenía razón en algunos casos (gases nobles). La ley proporciona un método directo para descubrir la fórmula molecular de un gas; la fórmula ofrece, a su vez, las masas atómicas relativas de los elementos presentes en ella. La ley de Avogadro muestra que los gases simples hidrógeno y oxígeno son diatómicos (H_2 y O_2) y que el agua es H_2O, y no HO, como creía Dalton. La reivindicación de Cannizzaro supuso el comienzo de la univocidad de las fórmulas químicas.

Pero ¿quién era Avogadro? Los estudios realizados en los últimos veinte años habían perfilado la imagen de un científico especulativo, sin inclinación hacia la actividad de tipo experimental. Nacido en 1776 y fallecido en 1856, Amedeo Avogadro siguió la tradición familiar y estudió leyes, aunque abandonó el foro por la docencia de física y química en Vercelli. En 1816, el rey Vittorio Emanuele I instituyó en Turín la cátedra de física sublime (física matemática). Avogadro fue llamado para ocuparla a propuesta de Prospero Balbo, presidente de la Academia de Turín. La mantuvo hasta finales de 1822, cuando fue suprimida a raíz de las revueltas estudiantiles de 1821.

Además, se nos revela ahora, fue socio muy activo y responsable en el cumplimiento de las tareas técnico-científicas de la Academia de Ciencias de Turín en la primera mitad del siglo XIX. El *motto* de la entidad, a la que perteneció desde 1819, rezaba *Veritas et utilitas,* leyenda que compendiaba el talante práctico de las instituciones surgidas a imagen de la famosa Real Sociedad londinense, cuyo lema era *Nullius in verba*: es decir, había que guiarse por lo observado o experimentado, no por las palabras de autoridad alguna.

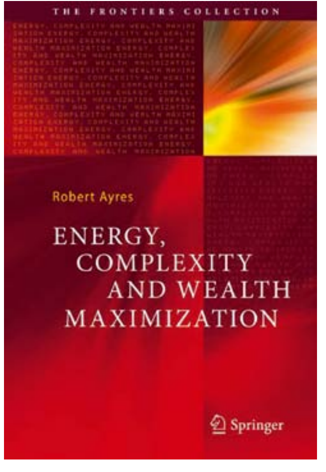
En los archivos de la Academia de Turín se conservan un millar largo de documentos, entre informes, opiniones y juicios que los académicos emitieron en su labor de consejeros sobre numerosas cuestiones concernientes a la actividad institucional (peticiones de patentes, memorias sometidas a una posible publicación, etcétera). Documentos cuyo valor trasciende lo científico para abarcar la historia de la economía, la técnica y el pensamiento de comienzos del siglo XIX. Más de setenta documentos portan el juicio de Avogadro. En el razonamiento de la concesión de una patente industrial (un «privilegio») se refleja su preparación y habilidad experimental, atento siempre a satisfacer las exigencias económicas a través del progreso científico-técnico. Las solicitudes sobre las que informó inciden en el sector textil, el de la seda y el de la edición, sin olvidar el del alumbrado o los barcos de vapor.

En su tiempo, la máquina de vapor ocupaba los afanes de muchos comerciantes e inventores. En este ámbito aplicó sus conocimientos sobre la teoría del calor a la valoración de los proyectos. También reviste interés sobre el sector de las comunicaciones a propósito del telégrafo. La patente la poseía ya una compañía multinacional representada por empresarios franceses e ingleses que querían introducir el telégrafo eléctrico inventado por Cooke y Wheatsone. Avogadro no puso reparos técnicos, pero sí económicos, y les negó la exclusividad.

En estas *Relaciones* hay cuatro informes de Avogadro dedicados al alumbrado por gas. El solicitante de una de las patentes, L. Mazzara, alegaba que ya poseía patentes sobre el particular en Inglaterra y en los Estados Austriacos. A ello la Academia de Ciencias de Turín respondía que en esos países las patentes se concedían a cualquiera que lo solicitara «sin previo examen de las invenciones propuestas». Entre los informes relativos a memorias que aspiraban a la publicación, destaca, por el trato severo que recibe, la memoria de Luigi Brenta sobre la naturaleza de la luz y el espectro solar. Se le reprocha al autor que no presente ningún hecho nuevo, sino que se limite a expresar ideas vagas e incoherentes. Avogadro entendía el avance de un país como la acción mancomunada de teorías sólidas y sobrias, aplicación técnica y divulgación: los raíles sobre los que correría la ciencia desde entonces.

—*Luis Alonso*





ENERGY, COMPLEXITY AND WEALTH MAXIMIZATION
Robert Ayres
Springer International Publishing, 2016.

«Esta vez es diferente»

La importancia de la energía explicada a expertos de otras áreas

El libro *Energy, complexity and wealth maximization* («Energía, complejidad y maximización de la riqueza»), de Robert Ayres, es la última contribución de este gran científico al análisis energético, tan desaparecido de nuestras facultades. Junto con autores como James Kay o Tim Allen (ecología) o Vaclav Smil (sistemas energéticos), el trabajo de Bob Ayres se ha centrado no solo en analizar y explicar el papel de la energía en el origen de la vida y el funcionamiento de los sistemas naturales y humanos, sino en educar a profesionales de otras áreas en el rol crucial que desempeña la energía. Ese es precisamente el objetivo de este libro: explicar la importancia de la energía a personas formadas en otras ramas del conocimiento que, normalmente, no le prestan demasiada atención, como los economistas.

¿Por qué centrarse en los economistas? Porque, ante la pregunta inocente de un estudiante sobre dónde están los recursos naturales en la función de producción normalmente empleada en economía (la cual solo depende del capital K y del trabajo L: $Y = Af(K,L)$, donde Y denota el PIB y A es una variable que, en teoría, recoge el avance tecnológico), la respuesta de muchos profesores de materias como crecimiento económico es, simplemente, añadirlos a la función. Esto tiene el problema de obviar que la producción y la reproducción tanto del capital como del trabajo necesitan recursos naturales: un error repetido por economistas de prestigio como Joseph Stiglitz o Robert Solow. El libro aborda estos problemas desde la perspectiva de los sistemas complejos, las redes ecológicas y la termodinámica de sistemas fuera del equilibrio para mostrar la importancia de la energía en la evolución de los sistemas naturales y sociales, [*véase* «Economía biofísica», por Jesús Ramos Martín; Investigación y Ciencia, junio de 2012].

La obra se divide en tres partes. La primera se centra en definir conceptos fundamentales, como entropía y «exergía» (o energía útil), así como en analizar el papel de la energía en la creación del universo, el origen de la vida y el funcionamiento del sistema terrestre y los ciclos que lo regulan. La segunda presenta la importancia de la energía en el avance de la ciencia y la técnica, abordando incluso las limitaciones en términos tecnológicos de la actual dependencia del petróleo como recurso agotable. Por último, la tercera recoge desde la visión de la economía ortodoxa hasta las tesis que hoy comparten ecólogos, economistas ecológicos y otros científicos con respecto a la relación entre la disponibilidad y uso de energía y la generación de riqueza material, así como los desafíos que encontramos en una sociedad fuertemente dependiente de los recursos fósiles. El libro termina con una serie de apéndices orientados a profundizar en la modelización de la energía para explicar el crecimiento económico, y en cómo los límites de los recursos no se ciñen a la energía, sino también a la disponibilidad de materiales. Como decía Georgescu-Roegen, la materia también importa (*matter matters, too!*).

La energía, dice el autor, es la esencia de toda sustancia. La energía útil, o exergía, es la que permite la creación y condensación de la materia y los recursos, pero también la que hace mover el aparato industrial que transforma esos recursos en bienes y servicios que satisfacen las necesidades humanas: el «metabolismo biofísico» del que hablaba Georgescu-Roegen. Sin gradientes de energía disponible no hay evolución de los sistemas.

La evolución prima a los individuos, ecosistemas y sociedades que son capaces de procesar un mayor volumen de recursos, en la línea de lo apuntado por Howard Odum. Son estos gradientes de recursos disponibles los que permiten que las sociedades evolucionen hacia formas cada vez más complejas, con mayor cantidad de estructuras y con una mayor interacción entre individuos. Es decir, una ciudad resulta más compleja que una comunidad de cazadores-recolectores precisamente porque cuenta con una mayor disponibilidad de recursos.

Para numerosos economistas, como Stiglitz y Solow, el conocimiento constituye una especie de nuevo recurso que explica la mejora de la productividad y la creación de riqueza. Sin embargo, no tienen en cuenta la base material de ese conocimiento. La información y el conocimiento resultan baratos de reproducir pero costosos de producir. La generación de conocimiento requiere estructuras (universidades y centros de investigación) y mano de obra dedicada, cuyo mantenimiento consume importantes cantidades de recursos. Para Ayres, es la energía útil, o exergía (o, mejor dicho, el trabajo útil realizado con su consumo) lo que provoca los aumentos de productividad y, por ende, la creación de riqueza. Por tanto, ese cambio tecnológico (la *A* que aparece en la función de producción de Solow) depende de la disponibilidad de recursos.

Es aquí donde entra a colación el título de esta reseña. Como dice el autor, «esta vez es diferente», pues la sociedad se enfrenta por primera vez en la historia a la escasez de energía y de materiales, los cuales ponen en juego la posibilidad de crear riqueza material. Esto sigue siendo obviado por la mayoría de los economistas, que, en un exceso de optimismo tecnológico, todavía ven el conocimiento y el progreso técnico como disociado del consumo de recursos. Es decir, se sigue sin tener en cuenta la energía como fuente de riqueza y motor del crecimiento económico. Esto es así porque la mayoría de los modelos económicos que todavía se usan en la toma de decisiones asumen, erróneamente, que no hay límites a la oferta de energía. La misma miopía, nos indica el autor, parece aplicarse también a los recursos materiales, pues se sigue obviando la escasez geológica de los mismos.

En conclusión, no se puede permitir que la toma de decisiones se base en teorías ni en disciplinas que resultan extremadamente simplificadoras, como sucede con la economía. La riqueza material y el aumento del nivel de vida asociado van íntimamente ligados al consumo de recursos. Y la energía constituye el recurso fundamental, al ser necesario en cualquier proceso de transformación de unos recursos en otros.

Garantizar la continua provisión de estos recursos debería ser el objeto de la ciencia económica. Sin embargo, dado que hoy una parte considerable de la riqueza no es de carácter material, sino financiero, la disociación con nuestro entorno parece cada vez mayor. Esto hace que contribuciones como la de Bob Ayres con este libro sean cada vez más importantes, especialmente —aunque no solo— en las facultades de economía. Para que todos, incluidos quienes toman las decisiones, entendamos la base material de la vida, del proceso económico y, por ende, de la satisfacción de las necesidades humanas. *Energy, complexity and wealth maximization* debería ser de lectura obligada tanto para ecólogos como para economistas.

—Jesús Ramos Martín
Universidad Regional Amazónica
IKIAM
Tena, Ecuador

NOVEDADES



LA CIENCIA EN LA HISTORIA DE MÉXICO
Eli de Gortari
Reedición de la obra de 1963
Fondo de Cultura Económica, 2016
ISBN: 9786071626332
633 págs. (320 $Mex)



EL GEN
UNA HISTORIA PERSONAL
Siddhartha Mukherjee
Debate, 2017
ISBN: 9788499927534
768 págs. (24.90 €)



LAS 'MENTIRAS' CIENTÍFICAS SOBRE LAS MUJERES
S. García Dauder y Eulalia Pérez Sedeño
Libros de la Catarata, 2017
ISBN: 978-84-9097-265-6
256 págs. (18 €)



EL GRAN CUADRO
LOS ORÍGENES DE LA VIDA, SU SENTIDO Y EL UNIVERSO ENTERO
Sean Carroll
Pasado & Presente, 2017
ISBN: 9788494619311
519 págs. (35 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Abril 1967

Relaciones raciales

«La idea de "poder negro" es incendiaria. Fue introducida en un ambiente de militancia (durante la marcha de James Meredith por Misisipi en junio pasado) y en muchos sectores de la población se identifica con disturbios y violencia. La realidad es que alguna forma de poder negro podría resultar esencial. La experiencia sobre los estadounidenses de raza negra, respaldada por numerosos estudios históricos y psicológicos, sugiere que las necesidades profundas de los más pobres y alienados no pueden ser cubiertas —y que, por tanto, el malestar racial puede no tener fin— salvo mediante la influencia de una comunidad negra unificada y organizada con un auténtico poder político y económico. El efecto traumático de la separación de África, la esclavitud y la negación de oportunidades políticas y económicas tras la abolición crearon en la comunidad negra fuerzas de escisión psicológica y social. —James P. Comer»

Comer es profesor titular de psicología en la Universidad Yale desde 1975.



Abril 1917

Declaración de guerra

«A veces, en las grandes crisis de la historia humana ha sucedido que la totalidad de una raza, un credo o una lengua, de común acuerdo, ha prestado oídos a la voz de un único hombre. Notable entre tales ocasiones será considerada la sesión conjunta de las dos ramas del Congreso, que se reunieron la noche del 2 de abril para oír de labios del presidente de los Estados Unidos [Woodrow Wilson] por qué la gran república de la cual es jefe ejecutivo se veía obligada a declarar que existe un estado de guerra entre ella y la mayor autocracia militar de todos los tiempos. Particularmente aceptable para el pueblo estadounidense es la parte de la alocución del presidente que aclara que no entramos a luchar contra el pueblo alemán, sino contra esa camarilla militar que lo ha conducido, engañado y confiado, a una guerra de agresión y ha intentado la conquista del mundo.»

La queja de un lector

«Hace más de diez años que soy lector de su revista. Especialmente grata era su imparcialidad en todos los aspectos, tanto científicos como políticos... hasta el estallido de la guerra europea. Desgraciadamente, parecen ustedes creer que deben impregnarse de simpatía por los aliados, pues se presume que la mayoría de sus lectores se compone de gentes nacidas en esos países. ¿O puede deducirse que Wall Street y los fabricantes de municiones influyen, a través de su Departamento de Patentes, en el color de sus páginas?»

Los redactores de Scientific American *respondieron en 1917: «La comunicación anterior procede de México y fue escrita en un alemán impecable. Como muestra del pensar y razonar teutones, debe concedérsele un valor de primer orden».*

Orugas de tractor

«Ya hace más de diez años del primer intento de aplicar el principio de los rodamientos de bolas a las orugas de los tractores. Durante unos tres años la oruga de bolas se ha fabricado comercialmente, prueba sobrada de la viabilidad del invento. La ventaja de este tipo de orugas consiste en que reducen la fricción. Los experimentos fueron efectuados por la facultad de agricultura de la Universidad de California (*véase la ilustración*).»



ORUGA DE TRACTOR perfeccionada para desplazarse mejor por laderas, terrenos embarrados y zanjas, 1917.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXVI, N.º 16, 21 DE ABRIL DE 1917



Abril 1867

La enfermedad de la leche

«Esta perniciosa afección de los animales domésticos es suficientemente misteriosa e importante como para haber inducido a la Cámara Legislativa de Illinois, hace algunos años, a votar a favor de una generosa recompensa para quien descubra su causa. El *Medical and Surgical Report* ofrece información procedente de tres observadores diferentes (una tomada del *Missouri Republican*) que se inclinan a señalar como responsable a *Eupatorium ageratoidis* (raíz de serpiente blanca). En junio de 1860, el señor William Jerry, de Edwardsville (Illinois), recogió estas plantas porque las confundió con ortigas y las ingirió (solas) como verdura hervida. Al día siguiente sufrió de repente la acometida de los síntomas usuales de la enfermedad de la leche: temblores violentos, postración y debilidad, y estado febril en el estómago. Se dice que a los animales les gusta esa planta cuando se halla en flor.»

El tremetol, la toxina de la raíz de serpiente blanca (ahora llamada Ageratina altissima*), principal responsable de la enfermedad de la leche, no fue formalmente identificado en el laboratorio hasta 1928.*



ROBÓTICA

¿Soy humano?

Gary Marcus

Los investigadores precisan de nuevos métodos para distinguir la inteligencia artificial de la natural.



NEUROCIENCIA

Efectos cerebrales de la desigualdad

Kimberly G. Noble

La pobreza podría afectar al tamaño, la forma y el funcionamiento del cerebro de los niños. ¿Conceder a los padres una ayuda económica serviría para prevenir el daño?

VUELOS ESPACIALES

Misión Alfa Centauri

Ann Finkbeiner

Un plan financiado por un multimillonario tiene la intención de enviar una sonda espacial hacia una estrella, pero ¿se puede realizar?



ECOLOGÍA

El redescubrimiento del Mediterráneo

Josep-Maria Gili, Susana Requena y Andrea Gori

Nuevas técnicas de exploración submarina están arrojando luz sobre un mar que alberga fondos sorprendentemente bien conservados, una elevada biodiversidad y especies que la ciencia todavía no había descrito.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT
Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Clara Moskowitz, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
PUBLISHER AND VICE PRESIDENT Jeremy A. Abbate

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes*; Andrés Martínez: *Apuntes, Nuevos datos sobre el origen de la célula eucariota* y *La paradoja del ejercicio físico*; Yago Ascasibar: *La burbuja de la inflación cósmica*; José Óscar Hernández Sendín: *El problema de la caja negra* y *El secreto de la velocidad humana*; Fabio Teixidó: *Microbios patógenos de altos vuelos*; Xavier Roqué: *La introducción del cálculo diferencial en España*; Marián Beltrán: *La ciencia tiene un problema de género* y *La palabra silbada*; Juan P. Adrados: *El nuevo kilogramo*; Sara Arganda: *El peligro oculto en el espacio profundo*; J. Vilardell: *Interfaces inestables* y *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España